N° D'ORDRE : 11

# THÈSES

PRÉSENTÉES

## A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE BESANÇON

POUR OBTENIR

## LE GRADE DE DOCTEUR ÈS-SCIENCES MATHÉMATIQUES

PAR

**Marcel BONNEAU**

PREMIÈRE THÈSE

## Étude de quelques propriétés cinématiques des étoiles OB

DEUXIÈME THÈSE

## Propositions données par la Faculté

Soutenues le 10 Juillet 1964 devant la Commission d'examen

MM. J. DELHAYE — Président

F. NAHON
P. LACROUTE
Ch. FEHRENBACH
A. BLAAUW
— Examinateurs

N· D'ORDRE : 11

# THÈSES

PRÉSENTÉES

## A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE BESANÇON

POUR OBTENIR

## LE GRADE DE DOCTEUR ÈS-SCIENCES MATHÉMATIQUES

PAR

**Marcel BONNEAU**

---

PREMIÈRE THÈSE

### Étude de quelques propriétés cinématiques des étoiles OB

DEUXIÈME THÈSE

### Propositions données par la Faculté

Soutenues le 10 Juillet 1964 devant la Commission d'examen

MM. J. DELHAYE — Président

F. NAHON
P. LACROUTE
Ch. FEHRENBACH
A. BLAAUW
— Examinateurs

# FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE BESANÇON

Doyen Honoraire
M. GLANGEAUD

Professeurs Honoraires
MM. BAILLAUD, DUFFIEUX, THIRY, TRILLAT, UEBERSFELD, VINCENSINI.

Maître de Conférences Honoraire
M. GRANIER

Doyen

| | | |
|---|---|---|
| M. | JACQUEMAIN | Chimie Appliquée |

Assesseur

| | | |
|---|---|---|
| M. | MESNAGE | Chronométrie |

Professeurs

| | | |
|---|---|---|
| MM. | TRONCHET | Botanique |
| | CHATELET | Mathématiques |
| | PERROT | Chimie Générale |
| | DREYFUSS | Géologie Minéralogie |
| | THEOBALD | Géologie |
| | CROISOT | Méthodes Mathématiques de la Physique |
| | DELHAYE | Astronomie |
| | QUANTIN | Botanique |
| | CHALEAT | Mécanique Appliquée |
| | RIPPLINGER | Physiologie Animale |
| | NAHON | Mécanique Théorique |
| | BERNARD | Chimie Physique |
| | RIGAL | Mathématiques |
| | VIENOT | Physique Générale |
| Mme. | ROZIS | Physique |
| M. | THIEBAUT | Géologie Minéralogie |

Professeurs sans chaire

| | | |
|---|---|---|
| MM. | POTIER | Cristallographie Physique |
| | DEVIN | Chimie Générale |
| | GOMOT | Zoologie |
| | MOTCHANE | Electronique |

Maîtres de conférences

| | | |
|---|---|---|
| MM. | VALLEE | Mécanique Appliquée |
| | REAL | Zoologie |
| | GOUARNE | Mathématiques |
| Mlle | LEGRAND | Botanique |
| M. | THEOBALD | Physique PCB. SPCN |
| | REMOND | Chargé d'Enseignement de la Maîtrise de Conférences de Chronométrie |

Conseiller administratif universitaire
M. LAMBERT

A mes parents,

A ma femme,

A mes enfants,

A Monsieur le Professeur Adriaan Blaauw

A Monsieur le Professeur Jean Delhaye

Hommage de profonde gratitude.

UNIVERSITEITSBIBLIOTHEEK - LEIDEN

# INTRODUCTION

La découverte du rayonnement radioélectrique de l'hydrogène neutre sur la fréquence 1420 MHz, la raie 21 cm, est venue apporter ces dernières années un moyen puissant à l'étude de la répartition de la matière interstellaire au voisinage du plan galactique.

En effet, étant donnée la faible vitesse d'agitation de ce gaz, il est naturel de penser que le seul mouvement systématique des nuages d'hydrogène est un mouvement de rotation circulaire uniforme autour du centre de la Galaxie. Dans ces conditions, la vitesse radiale de ces nuages, déduite du déplacement de la raie 21 cm par effet Doppler-Fizeau, nous renseigne immédiatement sur leur distance, si l'on dispose d'un modèle représentant correctement la variation de la vitesse de rotation de la Galaxie.

Cette méthode a permis aux astronomes hollandais Van de Hulst, Muller et Oort de montrer que la répartition de l'hydrogène interstellaire n'était pas uniforme mais au contraire que les régions correspondant à des densités maximales de ce gaz dessinaient des bras spiraux.

Cependant, on a maintenant des raisons de penser que la répartition de l'hydrogène ainsi obtenue est faussée par l'existence de mouvements systématiques importants se superposant au mouvement de rotation pure. De tels mouvements sont pratiquement indécelables par les observations radioastronomiques.

On sait que la distribution des supergéantes bleues qui sont des étoiles jeunes est intimement liée à celle des nuages d'hydrogène dans lesquels elles se sont formées. Il nous a donc semblé possible de reconnaître l'existence de mouvements systématiques éventuels intéressant à la fois ces étoiles et les nuages d'hydrogène, en étudiant les propriétés cinématiques de ces étoiles et plus particulièrement les déviations de leur vitesse par rapport à la vitesse de rotation pure.

Une telle étude ne peut être entreprise que si l'on dispose d'un matériel important et de très bonne qualité, notamment en ce qui concerne l'évaluation toujours très délicate de la distance des étoiles.

Cependant, l'interprétation des résultats obtenus ne pourra être entreprise qu'une fois reconnue et, si possible, estimée l'influence des incertitudes des données d'observation et des relations utilisées pour éliminer les mouvements systématiques déjà identifiés, c'est-à-dire, le mouvement du soleil par rapport à l'ensemble des étoiles O et B et la rotation différentielle de la Galaxie. Ainsi, nous avons attaché une grande importance à l'élimination de ce dernier mouvement et, en particulier, au choix de la constante A de Oort.

L'étude dont les résultats font l'objet du présent Mémoire a été entreprise à la suggestion de M. J. Delhaye, directeur de l'Observatoire de Besançon, à qui je tiens à exprimer ma profonde

reconnaissance pour les précieux conseils et les nombreux encouragements qu'il n'a cessé de me prodiguer.

Je tiens aussi à exprimer à M. A. Blaauw, directeur du Laboratoire Astronomique Kapteyn de Groningue, ma profonde gratitude pour l'accueil qu'il m'a réservé lors de mes séjours dans son Laboratoire, pour ses nombreux conseils et la bienveillante attention avec laquelle il a toujours suivi mes recherches.

Je dois à M. le Professeur J. H. Oort d'avoir attiré mon attention sur la confirmation apportée par l'étude de l'hydrogène interstellaire au mouvement systématique décelé dans le bras de Persée, qu'il veuille bien trouver ici l'expression de ma respectueuse gratitude.

Il m'est agréable de remercier aussi tous ceux qui m'ont aidé dans mes recherches, particulièrement,

M. F. Nahon, pour l'intérêt qu'il a porté à mon travail,

Mme C. Froeschlé, pour l'aide très efficace qu'elle m'a apportée dans l'exécution de nombreux et fastidieux calculs,

mes collègues du Laboratoire Kapteyn et de l'Observatoire de Besançon avec qui j'ai eu de fructueuses conversations.

# CHAPITRE I

# CATALOGUE D'ÉTOILES O ET B

## ELABORATION DU CATALOGUE

Un catalogue d'étoiles O et B a été établi sous la forme d'un fichier qui renferme, entre autres informations, les coordonnées galactiques $l''$ et $b''$, la vitesse radiale R et la distance héliocentrique r de 989 étoiles de type spectral O et B et supergéantes de type AO, A1, A2 de faible latitude galactique ($-15° \leqslant b'' \leqslant +15°$). Pour des raisons qui seront exposées plus loin, ce catalogue a été limité aux étoiles dont la longitude galactique $l''$ est comprise entre 75° et 255°. Ce catalogue sera publié; il contiendra en particulier la liste des sources auxquelles ont été empruntées les données nécessaires à son élaboration.

En réalité, les étoiles qui figurent dans ce catalogue sont contenues dans une région limitée, pour la commodité de la sélection, par des arcs de cercle d'ascension droite et de déclinaison constante et qui recouvrent entièrement la région dont les limites sont indiquées ci-dessus. De ce fait, quelques étoiles du catalogue sortent légèrement de ces limites. Ces étoiles ont été éliminées de toutes les études et de toutes les déterminations que nous mentionnerons par la suite.

La figure 1 montre la distribution des projections sur le plan galactique de l'ensemble des étoiles du catalogue.

La région étudiée a été divisée en 6 secteurs égaux limités par les longitudes 75°, 105°, 135°, 165°, 195°, 225° 255° et que nous désignerons par les notations :

| | | | |
|---|---|---|---|
| S. 1 ..... | $75° \leqslant l'' < 105°$ | S. 4 ..... | $165° \leqslant l'' < 195°$ |
| S. 2 ..... | $105° \leqslant l'' < 135°$ | S. 5 ..... | $195° \leqslant l'' < 225°$ |
| S. 3 ..... | $135° \leqslant l'' < 165°$ | S. 6 ..... | $225° \leqslant l'' \leqslant 255°$ |

La plupart des études et des déterminations que nous exposerons ici, ont d'abord été effectuées indépendamment dans chacun de ces 6 secteurs, avant d'être étendues, s'il y a lieu, c'est-à-dire si la concordance des résultats le permet, à l'ensemble de la région étudiée.

## VITESSES RADIALES -

Les vitesses radiales proviennent, pour la plupart des étoiles, du General Catalogue of Stellar Radial Velocities (GCRV) de R. E. Wilson (1953), des nombreuses listes publiées depuis 1956 par l'Observatoire de Haute Provence sous la direction de Ch. Fehrenbach et d'un catalogue de R. M. Petrie et J. A. Pearce (1962). La vitesse radiale adoptée R d'une étoile figurant dans plusieurs listes a été calculée en formant la moyenne pondérée des diverses déterminations. Le poids 3 a été affecté aux vitesses radiales du Wilson dont la qualité est a ou b, le poids 2 à celles dont la qualité est c, le poids 1 à la qualité d et le poids $\frac{1}{2}$ à la qualité e. Pour les vitesses radiales provenant des autres listes, la pondération utilisée est indiquée dans le tableau 1.

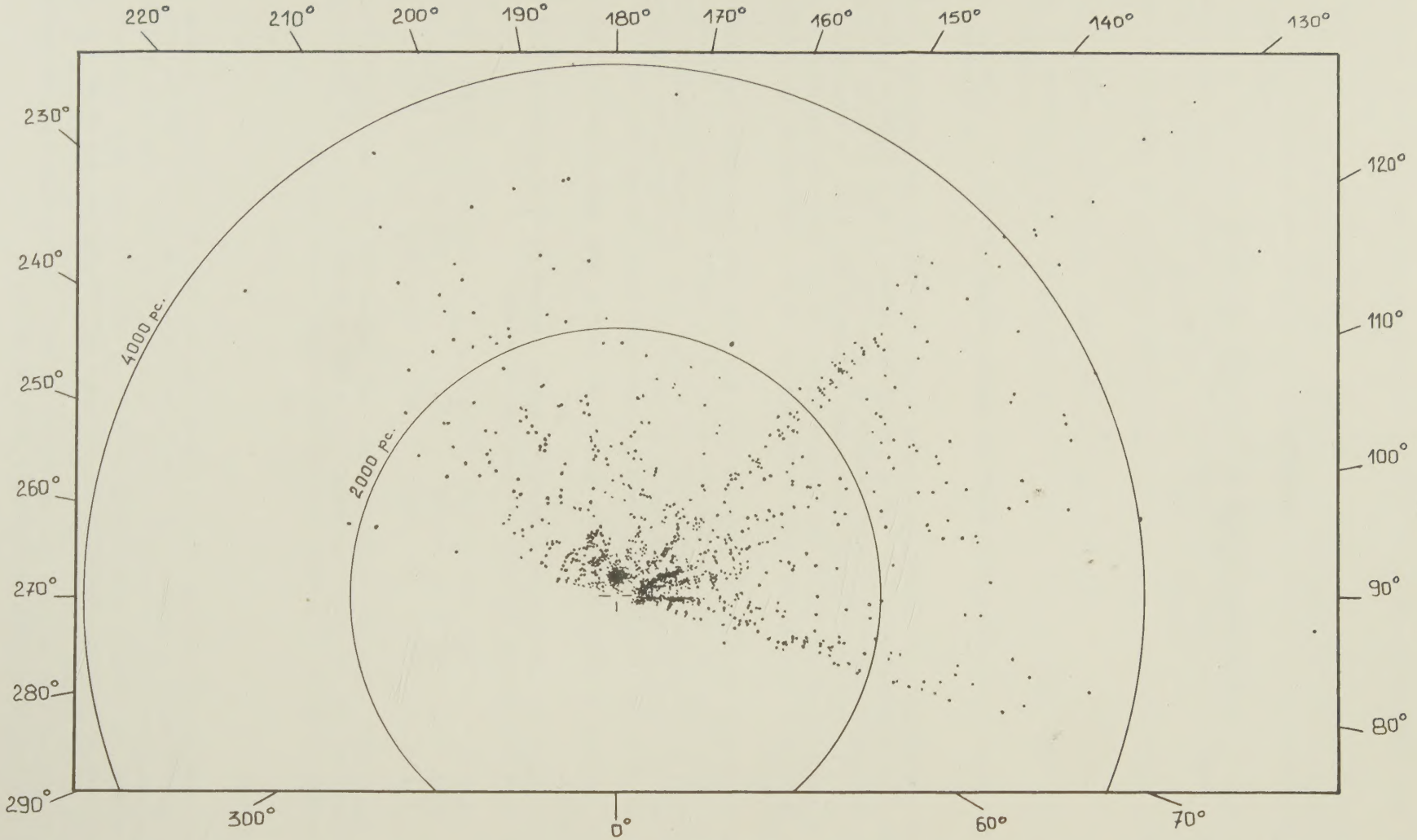


Fig. 1 - Distribution des étoiles du catalogue dans le plan galactique. (au voisinage du soleil un point représente plusieurs étoiles).

Tableau 1

| E. P. | GCRV | | Autres listes |
|---|---|---|---|
| en km. s $^{-1}$ | Q | Poids | Poids |
| < 0,9 | a | 3 | 3 |
| 1,0 - 2,0 | b | 3 | 2 |
| 2,1 - 5,0 | c | 2 | 1 |
| 5,1 10,0 | d | 1 | 1/2 |
| > 10,0 | e | 1/2 | 1/2 |

Définition des qualités Q et des poids
E.P. = erreur probable

La deuxième colonne du tableau indique la qualité affectée par R. E. Wilson aux vitesses radiales dont l'erreur probable figure dans la première colonne. On voit donc, qu'à erreur probable égale, les vitesses du GCRV entrent avec un poids plus grand que celles des autres listes dans la détermination de la vitesse radiale adoptée. Mais on sait que le mode d'estimation de ces erreurs est très différent dans l'un et l'autre cas. Dans le cas du GCRV, les erreurs probables ont été calculées en se basant sur l'accord des déterminations provenant de différents observatoires, ces mesures ayant été, au préalable, dépouillées de leur écart systématique global. Dans le cas des autres catalogues, l'évaluation de ces erreurs repose uniquement sur l'accord interne des mesures individuelles effectuées avec le même instrument.

Les premiers à notre connaissance, M. W. Feast et A. D. Thackeray (1958) ont signalé la présence d'un écart systématique important entre les vitesses radiales déterminées à l'Observatoire Lick et les vitesses radiales déterminées dans d'autres observatoires. Cet écart, de l'ordre de -10 km. s$^{-1}$, n'affecte que les étoiles B dont la magnitude est plus grande que 6,5 m, les vitesses radiales des autres étoiles étant en bon accord avec les déterminations provenant des autres observatoires. Cet écart a été retrouvé par Petrie R. M. et Pearce J. A. (1962). Il est étonnant qu'une erreur systématique aussi importante n'ait pas été décelée par R. E. Wilson lors de l'élaboration de son catalogue. Mais il est possible qu'elle ne porte que sur un nombre relativement peu important de déterminations et, plus exactement, sur les dernières séries de mesures effectuées par F. J. Neubauer ; la dernière de ces séries, communiquée à R. E. Wilson à titre privé, n'a du reste jamais été publiée. Il est donc peut-être aussi dangereux de corriger de + 10 km. s$^{-1}$ l'ensemble des vitesses radiales des étoiles B de magnitude supérieure à 6,5 que de ne pas appliquer cette correction. Pour notre part, nous avons préféré limiter notre étude aux régions dans lesquelles les déterminations de Lick ne représentent qu'une très faible proportion du matériel utilisé et sont, dans la plupart des cas, associées à d'autres déterminations. Cependant, le secteur 6 qui comprend déjà un nombre assez important d'étoiles dont la vitesse a été déterminée à Lick a été maintenu provisoirement à titre d'essai.

## CLASSIFICATION M. K. ET PHOTOMETRIE -

La classification de Morgan-Keenan et la photométrie ont été empruntées principalement aux catalogues publiés par W. W. Morgan, A. D. Code et A. E. Whitford (1955), par W. A. Hitlner (1956), par K. Osawa (1959, 1960 et 1962), par R. Bouigue (1959) et, pour la photométrie seulement, au catalogue de J. Stebbins, C. M. Huffer et A. E. Whitford (1940).

En général, l'accord entre les diverses classifications est très satisfaisant. Les écarts, peu nombreux, portent principalement sur les classes de luminosité des supergéantes. Quand ces écarts n'entraînaient pas de différence importante sur l'estimation de la magnitude absolue, c'est-à-dire pour les étoiles des tous premiers types spectraux, la classification la plus fréquemment indiquée a été adoptée. Dans le cas contraire, l'étoile a été rejetée.

La magnitude absolue visuelle M a été déduite de la calibration M. K. en utilisant une récente

calibration de A. Blaauw (1963). Au sujet de cette calibration, il faut faire une remarque importante pour la suite de cette étude : contrairement à certaines calibrations plus anciennes, elle a été élaborée sans faire intervenir la rotation galactique différentielle comme critère de distance.

La magnitude absolue M en fonction de la classification M.K. est indiquée dans le tableau 2 pour les étoiles de type spectral O5 à A2.

Tableau 2

| type spectral | classe de luminosité | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | V | IV | III | II | Ib | Iab | Ia |
| O5 | (-5,5) | | | | | | |
| O6 | -5,5 | | | | | | |
| O7 | (-5,3) | | | | | | |
| O8 | -5,2 | | | | | | |
| O9 | -4,8 | -5,3 | -5,7 | -6,0 | -6,1 | -6,2 | -6,2 |
| O9,5 | (-4,6) | (-5,0) | (-5,4) | (-5,7) | (-5,9) | (-6,2) | (-6,2) |
| BO | -4,4 | -4,8 | -5,0 | -5,4 | -5,8 | -6,2 | -6,2 |
| BO,5 | (-4,0) | (-4,4) | (-4,7) | (-5,2) | (-5,7) | (-6,2) | (-6,4) |
| B1 | -3,6 | -4,1 | -4,4 | -5,0 | -5,7 | -6,2 | -6,6 |
| B2 | -2,5 | -3,3 | -3,6 | -4,8 | -5,7 | -6,3 | -6,8 |
| B3 | -1,7 | -2,5 | -2,9 | -4,6 | -5,7 | -6,3 | -6,8 |
| B4 | (-1,3) | (-2,1) | (-2,5) | (-4,2) | (-5,7) | (-6,3) | (-6,9) |
| B5 | -1,0 | -1,8 | -2,2 | -4,4 | -5,7 | -6,3 | -7,0 |
| B6 | (-0,7) | (-1,5) | (-1,9) | (-4,2) | (-5,7) | (-6,3) | (-7,0) |
| B7 | -0,4 | -1,2 | -1,7 | -4,0 | -5,6 | -6,4 | -7,1 |
| B8 | +0,1 | -0,7 | -1,0 | (-3,9) | -5,6 | -6,5 | -7,1 |
| B9 | +0,6 | -0,2 | -0,4 | -3,8 | -5,5 | -6,5 | -7,1 |
| B9,5 | (+0,8) | (+0,1) | (-0,5) | (-3,5) | (-5,3) | (-6,5) | (-7,1) |
| AO | +1,0 | +0,3 | (-0,6) | (-3,3) | -5,2 | -6,6 | -7,1 |
| A1 | +1,5 | +0,7 | -0,9 | -3,0 | -5,1 | -6,6 | -7,3 |
| A2 | | | | -2,9 | -5,0 | -6,7 | -7,5 |

Magnitude absolue visuelle d'après A. Blaauw (1963).
Les valeurs placées entre parenthèses ont été interpolées.

A défaut de classification M.K., aucune hypothèse n'a été faite sur la classe de luminosité des étoiles, sauf pour les étoiles de type O5 et O6 pour lesquelles, la valeur moyenne M = -5,5 a été adoptée.

La magnitude apparente visuelle V adoptée résulte généralement de la combinaison à poids égaux des déterminations photoélectriques récentes (Bouigue, Hiltner, Osawa, etc.) et des magnitudes apparentes provenant du "Revised Harvard Photometry". A défaut de celles-ci, les mesures photoélectriques de Stebbins, Huffer et Whitford ont été utilisées.

Les indices de couleur (B - V) exprimés dans le système U.B.V. de H.L. Johnson et W.W. Morgan (1953) proviennent des mêmes sources que les magnitudes apparentes. Les indices de couleur $C_1$ du système de Stebbins ont été convertis en indice (B - V) en utilisant la relation :

$$B - V = 2,07\ C_1 + 0,30, \qquad (1)$$

donnée par W. W. Morgan, D. L. Harris et H. L. Johnson (1953).

On sait que l'incertitude des déterminations des indices $C_1$ est nettement supérieure à celle des indices (B - V) qui est de l'ordre de 0,01 ou 0,02 unité de magnitude. Cette incertitude est multipliée par un facteur 2 lors de la transformation des indices $C_1$ dans le système U. B. V.. De plus, il n'est pas exclu a priori que cette transformation introduise une légère erreur systématique. Celle-ci étant due, d'une part à l'incertitude des valeurs numériques figurant dans la relation (1), d'autre part, au fait que cette relation a été déduite d'un matériel assez différent de celui qui est réuni dans notre catalogue. On peut donc craindre que l'usage indifférent de l'un ou l'autre indice

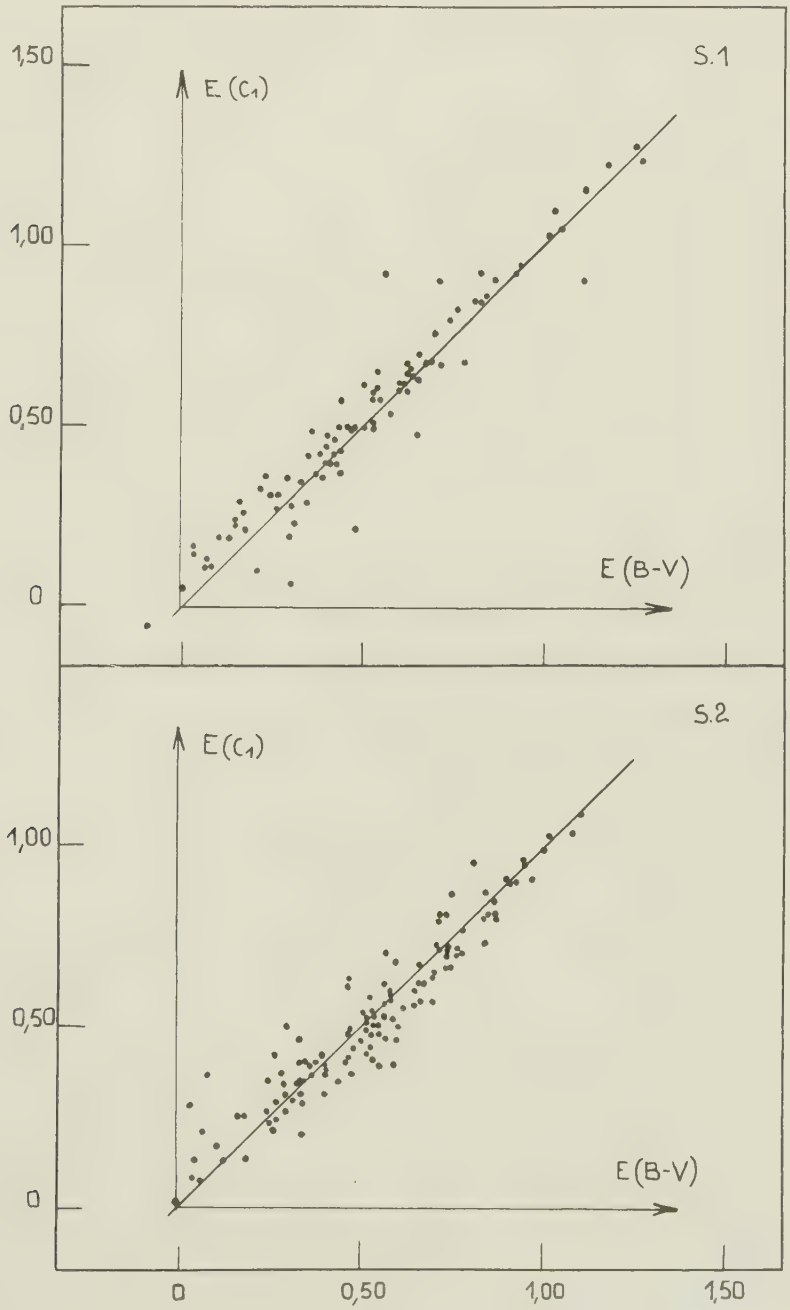


Fig. 2 - Comparaison des excès de couleur.

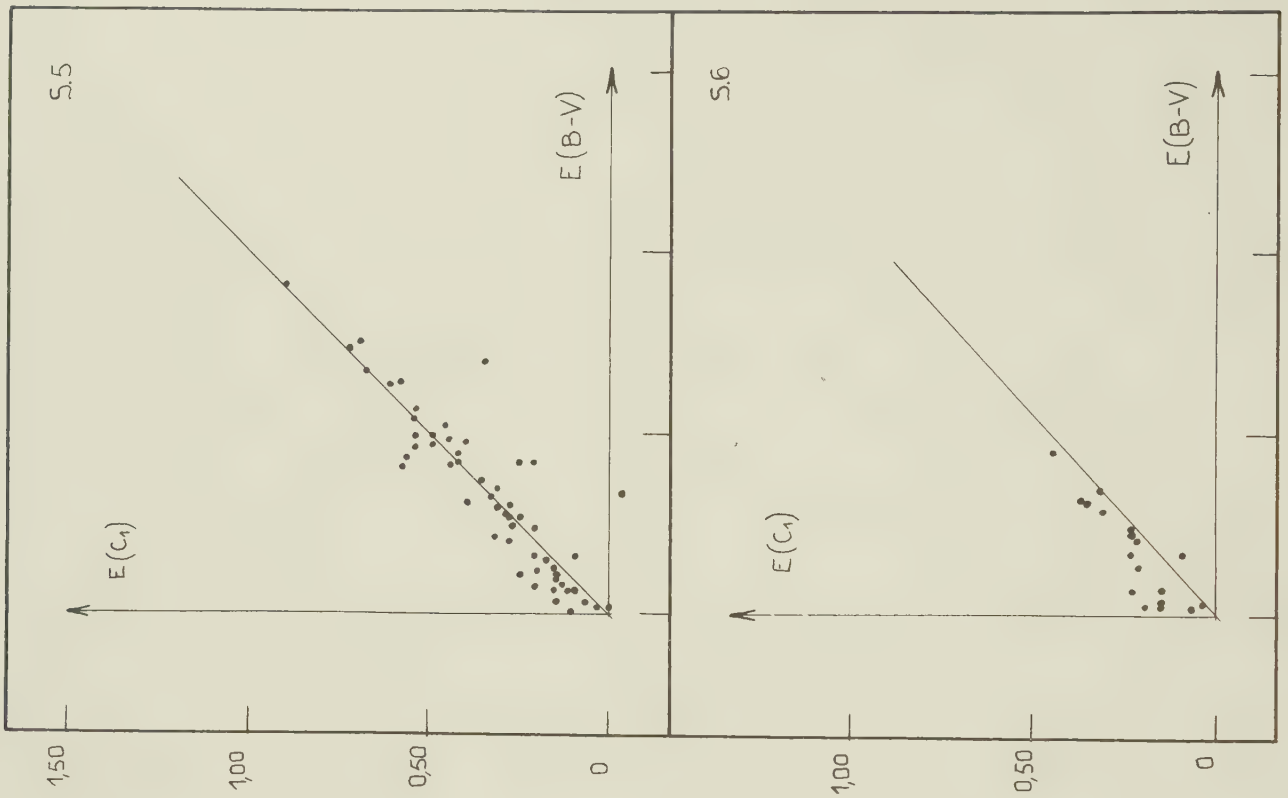


Fig. 2 (suite).

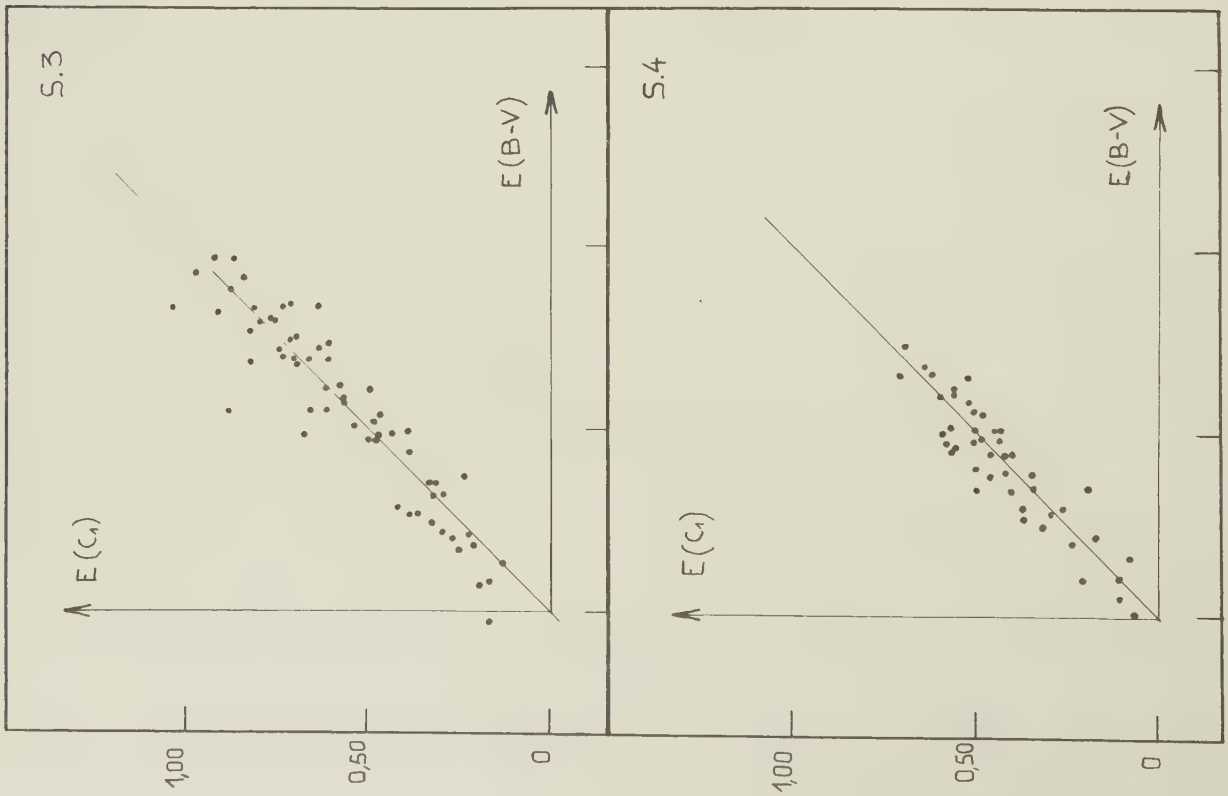


Fig. 2 (suite).

de couleur nuise à l'homogénéité des distances évaluées. Cependant, pour une fraction importante des étoiles du catalogue, les excès de couleur E(B - V) calculés à partir des indices (B - V) déterminés directement par l'observation ont pu être comparés aux excès de couleur $E(C_1)$ calculés après transformation de $C_1$ en indice (B - V) par la relation (1). Les 6 diagrammes de régression de la figure 2 résument cette comparaison effectuée indépendamment dans les 6 secteurs définis précédemment. Pour ne pas fausser d'une façon systématique les résultats de cette comparaison, les valeurs négatives des excès de couleur ont été maintenues dans la statistique, bien que celles-ci n'aient aucun sens physique. Malgré cela, il semble bien que la dispersion des nuages de points au voisinage de l'origine soit encore trop faible. Cette comparaison ne fait ressortir aucune erreur systématique appréciable, quel que soit le secteur considéré. L'écart-type de la dispersion des nuages de points est en moyenne de 0,07 m. Cette dispersion est due principalement aux incertitudes des excès de couleur $E(C_1)$.

Les indices de couleur intrinsèques $(B - V)_o$ adoptés ont été déterminés par W. W. Morgan, D. L. Harris et H. L. Johnson (1953) pour les étoiles de la séquence principale et corrigés par H. L. Johnson (1958) pour tenir compte de la classe de luminosité.

Les distances r, évaluées en parsecs, ont été calculées à l'aide de la relation fondamentale :

$$5 \log r = m - M \quad 3,0\, E + 5 \qquad (2)$$

dans laquelle le facteur 3,0 représente la valeur généralement adoptée du rapport de l'absorption interstellaire à l'excès de couleur E(B - V).

On pose généralement $m_o = V - 3,0E$ (magnitude apparente corrigée de l'absorption) et l'on désigne sous le nom de module de distance la quantité : $(m_o - M)$.

En aucun cas, la distance d'une étoile n'a été déduite de son appartenance (probable ou certaine) à un groupe d'étoiles dont la distance est connue.

## PRECISION DU CATALOGUE

### EVALUATION DE L'ECART-TYPE DE LA DISTANCE r DES ETOILES -

Habituellement, l'évaluation de cet écart-type est obtenue à partir de l'estimation des erreurs internes des différentes données d'observation entrant dans le calcul du module de distance. Cette méthode conduit généralement à un écart-type de l'ordre de 0,30 à 0,40 unité de magnitude, correspondant à une incertitude d'environ 20 % sur la distance elle-même. Or, cette méthode, basée sur l'accord interne des mesures, conduit nécessairement à un écart-type sous-estimé. La valeur ainsi trouvée doit être considérée comme une borne inférieure de l'écart-type réel.

On peut estimer l'incertitude de l'évaluation des distances stellaires d'une manière peut-être plus objective en calculant la dispersion des distances individuelles des membres d'un même groupe d'étoiles dont les dimensions sont suffisamment petites pour qu'elles puissent être négligées.

W. W. Morgan, A. E. Whitford et A. D. Code (1953) ont évalué la distance moyenne de 27 groupes stellaires (associations ou amas galactiques) à partir des distances individuelles de 225 membres probables de ceux-ci. 113 de ces étoiles figurent dans notre catalogue et se répartissent dans 15 de ces groupes comme l'indique le tableau 3. n° désigne le numéro assigné à chaque groupe par ces auteurs et N le nombre des membres contenus dans notre catalogue. Les colonnes 3 et 4 permettent de comparer les modules de distance $(m_o - M)_M$ évalués par Morgan, Whitford et Code aux modules $(m_o - M)_B$ que l'on déduit des modules de distance individuels $(m_o - M)_B$ que nous avons calculés.

Tableau 3

| n° | N | $\overline{(m_o - M)}_M$ | $\overline{(m_o - M)}_B$ | r (en pc) | σ |
|---|---|---|---|---|---|
| 10 | 2 | 11,8 | 11,4 | 1900 | |
| 12 | 1 | 11,5 | 10,7 | 1380 | |
| 13 | 3 | 10,0 | 9,9 | 960 | 0,52 |
| 18 | 3 | 12,0 | 11,4 | 1900 | |
| 20 | 3 | 12,0 | 11,3 | 1820 | |
| 23 | 4 | 7,8 | 8,3 | 440 | |
| 11 | 7 | 10,9 | 10,9 | 1510 | |
| 16 | 7 | 12,8 | 12,4 | 3020 | |
| 19 | 5 | 11,7 | 11,6 | 2090 | |
| 22 | 7 | 9,8 | 9,6 | 830 | 0,53 |
| 24 | 7 | 10,3 | 10,3 | 1150 | |
| 25 | 8 | 10,9 | 10,6 | 1320 | |
| 15 | 21 | 9,3 | 9,4 | 760 | 0,54 |
| 21 | 21 | 11,8 | 11,6 | 2090 | 0,51 |
| 27 | 14 | 10,8 | 11,0 | 1590 | 0,51 |

Les modules $\overline{(m_o - M)}_B$ sont en moyenne légèrement plus petits que ceux de Morgan, Whitford et Code. Cet écart systématique est de 0,2 unité de magnitude. Il est entièrement expliqué par la différence des calibrations en magnitude absolue utilisées, la classification M. K. adoptée étant la même pour toutes les étoiles à une seule exception près. La figure 3 montre l'étroite corrélation existant entre ces modules de distance. Les distances correspondant aux modules $\overline{(m_o - M)}_B$ sont données dans la 5ème colonne du tableau.

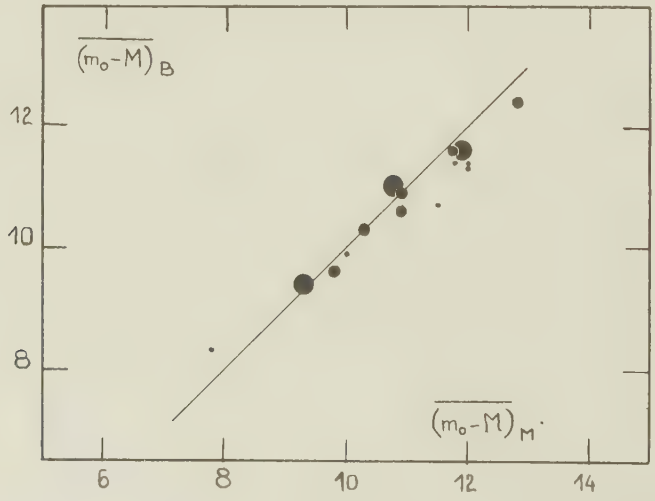


Fig. 3 - Comparaison des modules de distance de Morgan, Whitford et Code (1953) avec ceux de notre catalogue, (15 groupes).

Les groupes ont été répartis en trois classes d'après le nombre N de leurs membres probables. Nous avons calculé d'abord l'écart-type $\sigma$ de la distribution centrée des modules de distance des membres de chaque groupe, puis, pour les groupes ne contenant que peu d'étoiles, la valeur moyenne de ces écarts pour chacune des deux premières classes. Ces valeurs moyennes et les valeurs individuelles de l'écart-type des groupes de la troisième classe sont indiquées dans la 6ème colonne du tableau 3. L'accord entre ces différentes valeurs est remarquable. On peut adopter pour l'ensemble de la statistique la valeur moyenne $\bar{\sigma} = 0,52$.

En toute rigueur, cette valeur doit être corrigée de l'influence de la dispersion des distances exactes des différents membres d'un même groupe. Mais on peut montrer que cette correction est toujours très petite. Pour l'évaluer, nous admettrons que la dimension d'un groupe suivant la direction radiale est, en moyenne, du même ordre de grandeur que ses dimensions dans le plan perpendiculaire à cette direction. Si l'on considère, par exemple le groupe 21, on trouve que l'écart-type de la distribution des directions de ses membres est de $0^\circ,8$ en longitude et en latitude. Cela correspond, à la distance moyenne de 2100 pc, à une dispersion de l'ordre de 30 parsecs, c'est-à-dire à un écart-type d'environ 0,03 m sur le module de distance. Le même calcul appliqué au groupe 15, beaucoup plus proche du soleil (760 pc), montre que la dispersion des modules due aux dimensions du groupe est environ de 0,12 m. L'application du théorème de l'addition des variances conduit alors à corriger l'écart-type calculé précédemment de 0,01 m.

Donc, sous réserve que les étoiles proposées par Morgan, Whitford et Code appartiennent effectivement aux groupes désignés, on peut admettre que l'écart-type de la distribution des erreurs accidentelles des modules de distance du catalogue ci-inclus est de l'ordre de 0,5 unité de magnitude ; ce qui correspond à une incertitude de l'ordre de 25 % sur les distances elles-mêmes.

La figure 4 montre la répartition dans le plan galactique des membres probables du groupe 21 (association 1 per) d'après les distances que nous avons évaluées. En réalité, les dimensions de ce groupe sont au plus d'une centaine de parsecs. Cet exemple montre bien que, quel que soit le soin apporté à l'élaboration d'un catalogue (données d'observations récentes et précises, souvent confirmées par une ou plusieurs autres mesures indépendantes - choix des meilleures relations liant ces données aux quantités que l'on se propose de calculer), l'évaluation des distances individuelles des étoiles reste très incertaine.

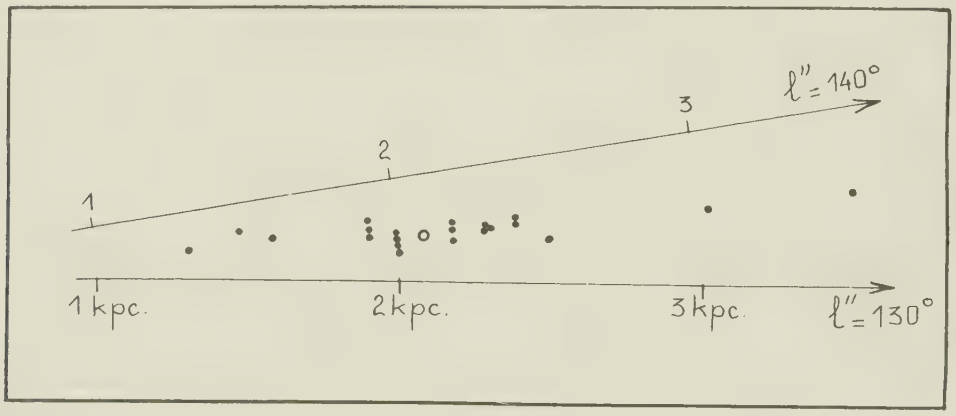


Fig. 4 - Répartition dans le plan galactique des membres probables du groupe 21, d'après les distances que nous avons évaluées. (Les dimensions de ce groupe sont en réalité de l'ordre d'une centaine de parsecs).

Comme nous le verrons au chapitre suivant, cette dispersion des distances n'a que peu d'influence sur les propriétés cinématiques globales que l'on peut déduire du matériel recueilli, par exemple : la détermination de la constante A de la rotation différentielle. En revanche, elle risque de nuire à l'interprétation de phénomènes plus localisés et qui n'intéressent qu'une fraction des étoiles étudiées, par exemple ; l'étude des déviations locales de la vitesse des étoiles par rapport au mou-

vement circulaire. Pour cette raison, nous avons estimé qu'il était préférable de limiter l'étude des propriétés cinématiques des étoiles de type-spectral O et B aux étoiles dont la distance est inférieure à 3000 parsecs.

## REPARTITION DES ETOILES DANS LE PLAN GALACTIQUE -

La répartition dans le plan galactique de l'ensemble des étoiles de notre catalogue est indiquée figure 1. L'examen de cette figure montre que cette répartition ne présente aucune corrélation apparente avec la structure spirale indiquée par H. C. van de Hulst, C. A. Muller et J. H. Oort (1954) pour les nuages d'hydrogène neutre et par W. W. Morgan, E. A. Whitford et A. D. Code (1953) pour les associations stellaires. Ce résultat négatif ne doit pas nous surprendre étant donné ce que l'on sait de la dispersion de l'évaluation des distances des étoiles. Nous pensons du reste que la répartition indiquée par la figure 1 n'a qu'un rapport très lointain avec la répartition réelle de l'ensemble des étoiles B. Cela, non seulement en raison de l'incertitude des distances mais surtout en raison des 3 sélections successivement opérées dans l'ensemble de ces étoiles pour ne retenir que celles dont on pouvait calculer à la fois la distance et la vitesse radiale. La répartition observée figure 1 dépend donc beaucoup plus des limites des programmes d'observations des stations spécialisées dans l'un des trois domaines de la photométrie, de la spectroscopie et de la mesure des vitesses radiales que de la structure réelle de l'ensemble des étoiles O et B. On peut en trouver un exemple caractéristique en considérant la région comprise entre les directions de longitude $l'' = 130°$ et $l'' = 140°$ qui, malgré une très forte absorption interstellaire jusqu'à 1000 parsecs, est particulièrement riche en étoiles. A une abondance naturelle due en partie à la présence dans cette région de l'association I Per s'ajoute un effet de sélection observationnelle très important et qui provient de l'accumulation d'observations complémentaires (vitesses radiales et photométrie) dans les champs J et 10 du programme de l'Observatoire de Haute Provence.

A ce sujet, disons combien il paraît souhaitable de généraliser la méthode très efficace des observations complémentaires dans une même région du ciel ou pour un certain nombre d'étoiles préalablement sélectionnées. Cette coordination des mesures de natures différentes éviterait bien des efforts inutiles et augmenterait considérablement le matériel utilisable. Nous savons par expérience combien il est difficile de réunir les données nécessaires à l'évaluation de la distance d'une étoile et, malgré le grand nombre de listes consultées, le nombre d'étoiles contenues dans notre catalogue ne représente que le quart des étoiles primitivement sélectionnées dans les catalogues de vitesses radiales.

La région que nous avons signalée précédemment contient aussi un nombre relativement important d'étoiles lointaines : 10 d'entre elles sont situées à plus de 3500 parsecs du soleil. Le diagramme de la figure 5 montre que l'excès de couleur de ces étoiles est en moyenne nettement plus faible que celui des étoiles proches. Ce fait n'est pas anormal en lui-même dans une région où l'absorption est particulièrement hétérogène et l'on peut penser, au contraire, que c'est précisément cette faible absorption qui permet l'observation d'étoiles aussi éloignées.

Cependant, le diagramme de la figure 6 sur lequel nous avons porté la vitesse radiale de ces étoiles en fonction de la distance r montre que la vitesse de ces étoiles s'écarte progressivement de la courbe représentant l'effet systématique de la rotation différentielle de la galaxie (voir chapitre II, page 275). La corrélation entre l'excès $R_c$ de la vitesse radiale de ces étoiles par rapport à la vitesse circulaire, d'une part, et l'écart e(abs) de leur absorption observée par rapport à l'absorption moyenne déduite des étoiles situées à moins de 3500 parsecs, d'autre part, est représentée figure 7. Cette corrélation montre bien qu'en moyenne la distance de ces étoiles est nettement surestimée.

Le caractère arbitraire de la définition d'une absorption moyenne ne nous a pas échappé et nous nous garderons bien de tirer des conclusions quantitatives de la corrélation établie.

Il ne semble pas que l'on puisse expliquer des écarts aussi importants entre les distances réelles et les distances évaluées par l'incertitude des magnitudes absolues déduites de la classification M. K.. Cette incertitude, due principalement à "l'épaisseur" des différentes séquences du diagramme de Hertzsprung-Russell est au plus de 0,5 ou 0,6 unité de magnitude. Nous pensons plutôt à une erreur portant sur la classification M. K. elle-même et plus précisément sur la classe de luminosité. Cette hypothèse vient d'être confirmée récemment par J. Boulon (1963) qui a effec-

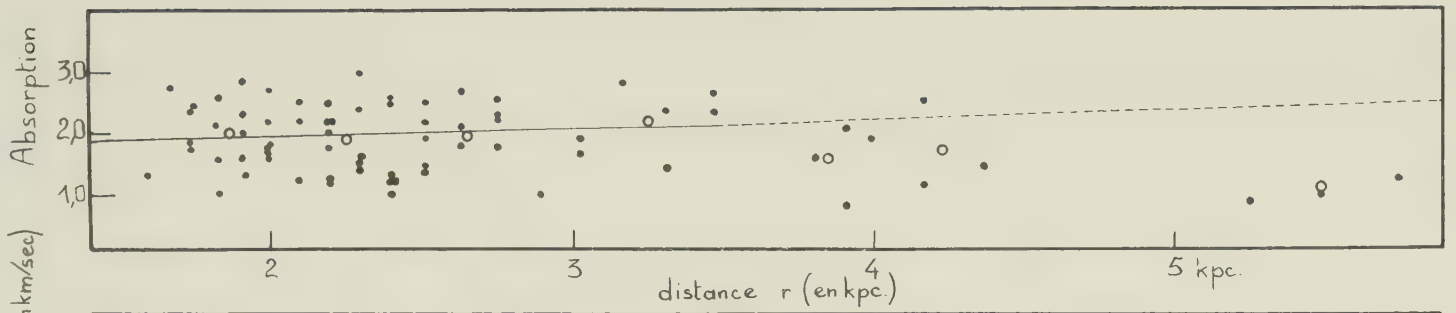
Absorption
3,0
2,0
1,0
2
3
4
5 kpc.
distance r (en kpc.)

Fig. 5

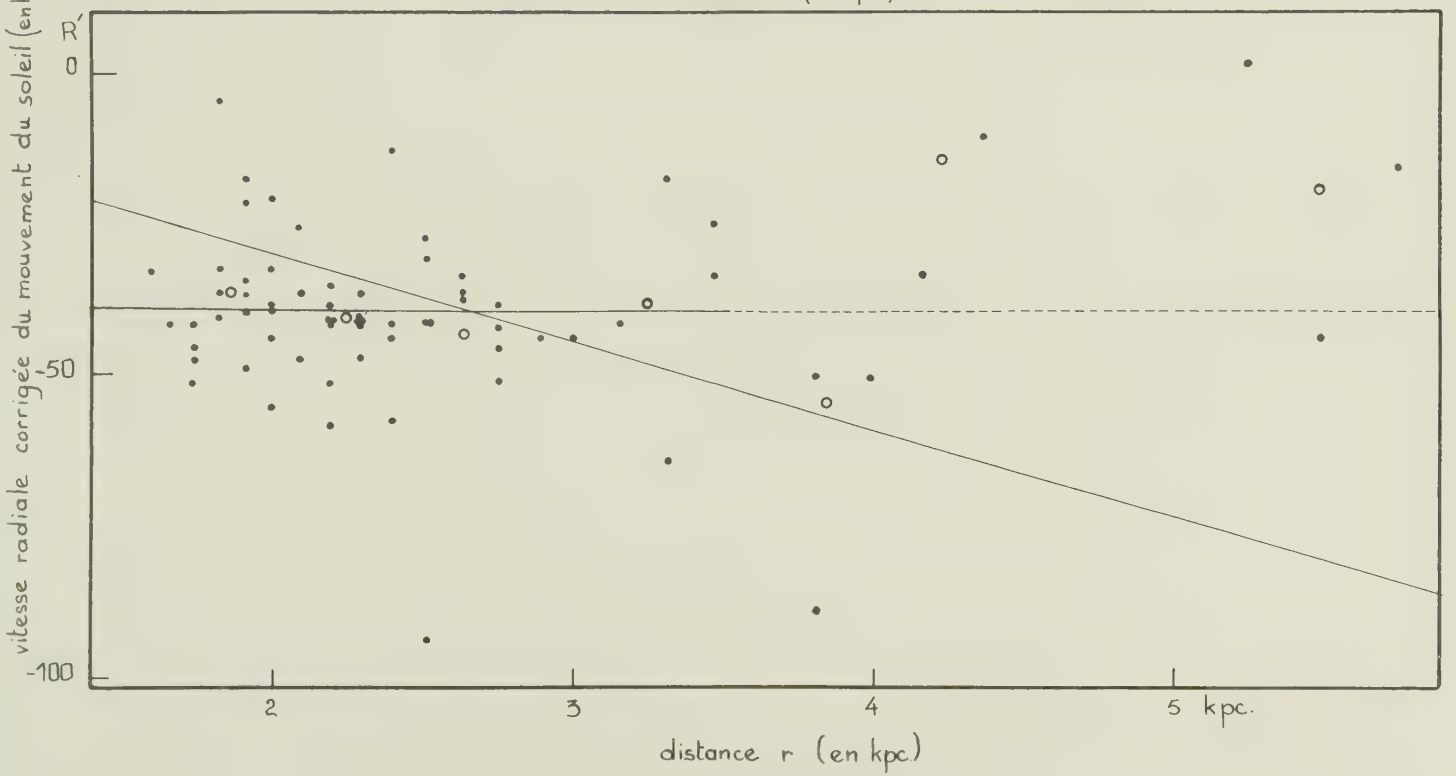
vitesse radiale corrigée du mouvement du soleil (en km/sec)
R'
0
-50
-100
2
3
4
5 kpc.
distance r (en kpc)

Fig. 6

tué une nouvelle classification M. K. de la plupart des étoiles de ce secteur. Si nous adoptons ces nouvelles classifications, les 10 étoiles étudiées ne présentent plus d'écarts notables en ce qui concerne la vitesse radiale et l'absorption.

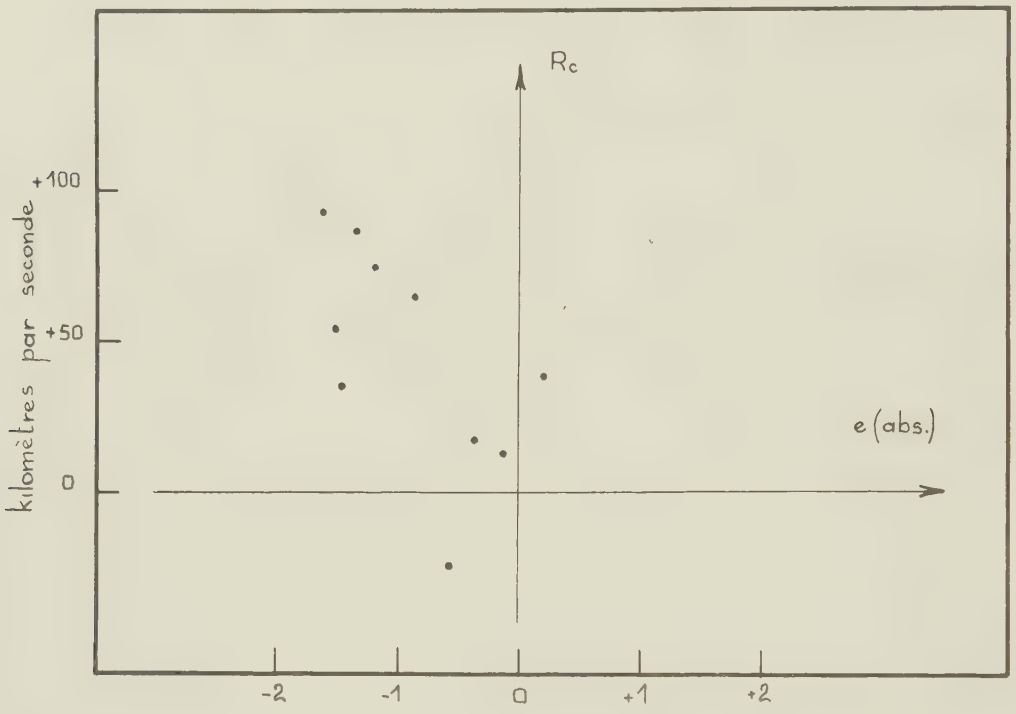


Fig. 7 - Corrélation entre l'excès $R_c$ de la vitesse radiale et l'écart e(abs) de l'absorption moyenne, pour les étoiles les plus lointaines situées entre $l^{II}$ =130° et $l^{II}$ = 140°.

## REPARTITION DE LA PRECISION DES VITESSES RADIALES EN FONCTION DE LA DISTANCE -

D'une façon générale, on constate que la précision des vitesses radiales décroît quand la distance des étoiles augmente. Il s'agit de la précision indiquée par les catalogues, c'est-à-dire de la qualité pour les étoiles du GCRV et des listes de l'Observatoire de Haute Provence, de l'écart-type ou de l'erreur probable pour les autres listes. Sauf pour les étoiles de qualité a qui sont généralement situées très près du soleil, cette variation est insensible pour les étoiles dont la distance est inférieure à 1000 parsecs et l'on peut considérer que le mélange des qualités des vitesses est homogène (fig. 8). A partir de 2000 parsecs les vitesses radiales dont la précision correspond aux qualités a et b du GCRV (tableau 1) sont relativement peu nombreuses. Le rapport du nombre de vitesses radiales de chaque qualité au nombre total d'étoiles contenues dans des zones de 1000 parsecs d'épaisseur est indiqué dans le tableau de contingence (tableau 4).

A priori, on peut penser que cette variation de la qualité avec la distance n'introduira pas d'effet systématique apparent en fonction de la distance dans l'étude des propriétés des vitesses radiales des étoiles considérées et que seule la précision des résultats en sera altérée. Mais il vaut mieux s'en assurer.

Ce sont les étoiles proches du soleil qui se prêtent le mieux à cette étude ou plus exactement à ce test, en raison de l'homogénéité déjà signalée du mélange des qualités et parce que les corrections à apporter à ces étoiles pour éliminer l'effet de la rotation galactique différentielle sont petites et peu sensibles aux erreurs accidentelles des modules de distance.

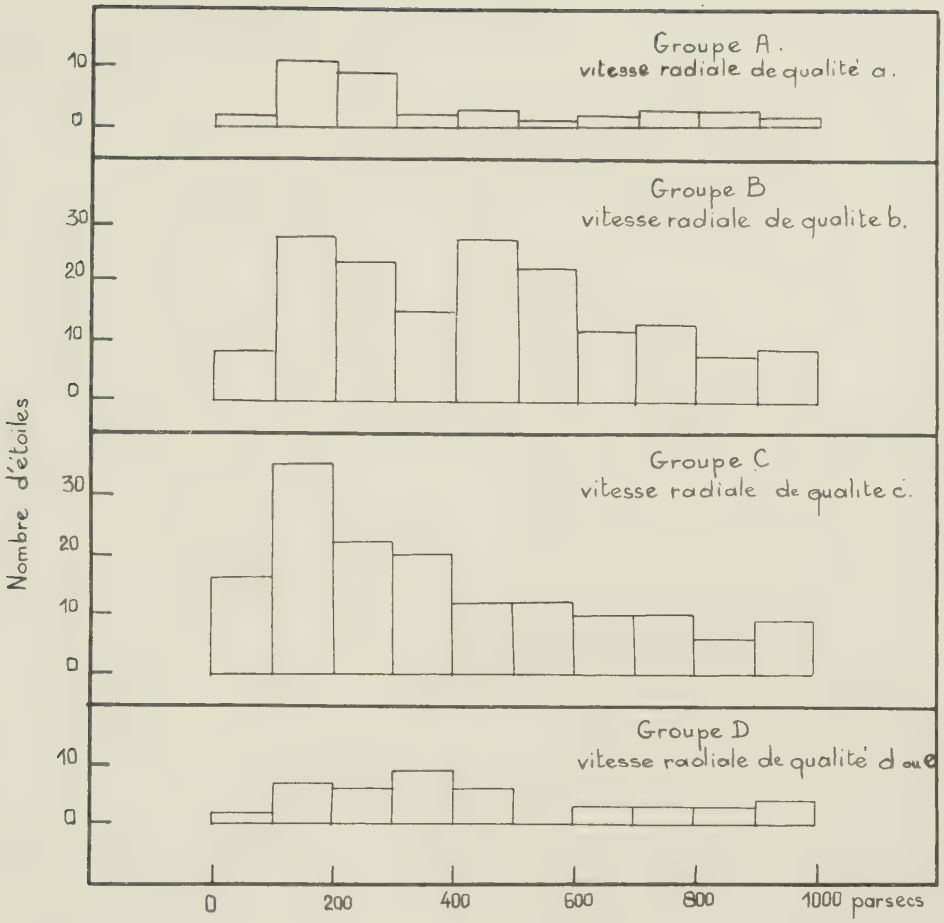


Fig. 8 - Répartition des étoiles en fonction de la distance et de la qualité de leur vitesse radiale.

Tableau 4

| distance en kpc \ qualité | a | b | c | d + e |
|---|---|---|---|---|
| $0 < r < 1$ | 0,14 | 0,31 | 0,30 | 0,25 |
| $1 \leqslant r < 2$ | 0,05 | 0,21 | 0,39 | 0,35 |
| $2 \leqslant r < 3$ | 0,04 | 0,13 | 0,30 | 0,53 |
| $r \geqslant 3$ | 0,00 | 0,18 | 0,42 | 0,40 |

Les étoiles du GCRV situées à moins de 1000 parsecs du soleil ayant été réparties en 4 groupes A, B, C, et D d'après la qualité a, b, c, d et e de leur vitesse (le groupe D contient à la fois les vitesses radiales de qualité d ou e), nous avons évalué la vitesse du soleil par rapport à chacun de ces groupes et comparé entre eux les résultats ainsi obtenus.

Le tableau 5 indique les différentes valeurs des composantes $U_o$ et $V_o$ de la vitesse du soleil par rapport à chacun des trois groupes A, C et D (voir chapitre II page 270). Les vitesses radiales des étoiles utilisées ont été dépouillées de l'effet de la rotation différentielle de la façon indiquée aussi au chapitre II (page 275). La composante $W_o$ de la vitesse du soleil perpendiculairement au plan galactique qui serait ici mal déterminée, a été prise égale à + 7,0 km. $s^{-1}$.

Tableau 5

| groupe | n | $U_o$ en km. $s^{-1}$ | $V_o$ en km. $s^{-1}$ | $\sigma$ en km. $s^{-1}$ |
|---|---|---|---|---|
| A | 32 | -20,2 ± 2,8 | +12,0 ± 3,1 | 11,6 |
| | 31 | -17,5 ± 2,1 | +12,0 ± 2,3 | 8,7 |
| C | 138 | -10,5 ± 1,5 | +13,1 ± 1,8 | 13,8 |
| D | 35 | - 3,2 ± 3,9 | +14,0 ± 4,1 | 16,2 |

Variation des composantes $U_o$ et $V_o$ de la vitesse du soleil en fonction de la précision des vitesses radiales des étoiles du GCRV situées à moins de 1000 parsecs du soleil ($W_o$ = + 7,0 km. $s^{-1}$)

Nous indiquons aussi dans le tableau 5 l'erreur-type des différentes déterminations de $U_o$ et $V_o$ et l'écart-type $\sigma$ de la distribution des vitesses radiales individuelles des étoiles de chaque groupe.

Les étoiles du secteur 6 qui conduisent à des résultats inacceptables - nous en aurons la confirmation dans un instant - ont été éliminées de ce calcul. La valeur $U_o$ = -20,2 km. $s^{-1}$ déduite des 32 étoiles du groupe A est nettement trop grande en valeur absolue. Cela est dû à la présence dans le secteur 4 de l'étoile HD 34078 dont la vitesse radiale est de + 59,1 km. $s^{-1}$. La suppression de cette étoile améliore nettement la valeur de $U_o$ et l'écart-type des vitesses radiales des étoiles du groupe A (seconde ligne des données du tableau 5 pour le groupe A).

On constate que la composante $U_o$ de la vitesse du soleil dépend fortement de la qualité des vitesses radiales des étoiles utilisées pour effectuer cette détermination. Nous allons montrer maintenant que cet effet ne peut être attribué au seul hasard et qu'il se retrouve dans les 6 secteurs étudiés avec une régularité surprenante.

Nous avons considéré cette fois les vitesses radiales $R_c$ corrigées à la fois des effets de la rotation galactique et du mouvement du soleil comme il est indiqué au chapitre suivant (page 275). Pour chacun des 6 secteurs nous avons calculé la vitesse radiale moyenne des étoiles des différents groupes A, B, C et D. Les résultats de ces calculs et leur erreur-type sont consignés dans le tableau 6. (Figures 9 a et 9 b)

On constate, qu'à une seule exception près, les vitesses radiales moyennes décroissent régulièrement avec la qualité des vitesses individuelles, quel que soit le secteur considéré. L'existence d'un effet systématique en fonction de la qualité des vitesses radiales semble donc bien établie. Cependant on peut s'interroger sur la nature même de cette corrélation : il est possible en effet que ces 2 quantités soient liées entre elles par l'intermédiaire d'une même troisième, la distance de l'étoile par exemple. Un effet systématique des vitesses en fonction de la distance entraînerait, en effet, une telle corrélation puisque ce sont les vitesses des étoiles les plus brillantes, donc en moyenne les plus proches, qui sont les mieux déterminées. Mais cette explication doit être écartée car, le mélange des qualités étant homogène ou presque dans la région considérée, il faudrait admettre l'existence d'un gradient des vitesses en fonction de la distance de l'ordre de - 100 à -150 km. $s^{-1}$ .$kpc^{-1}$ selon le secteur considéré. Ce qui est exclu.

Toutes les tentatives de mise en évidence d'une corrélation possible entre les vitesses et les qualités, d'une part, et un troisième paramètre représentant une caractéristique physique des étoiles

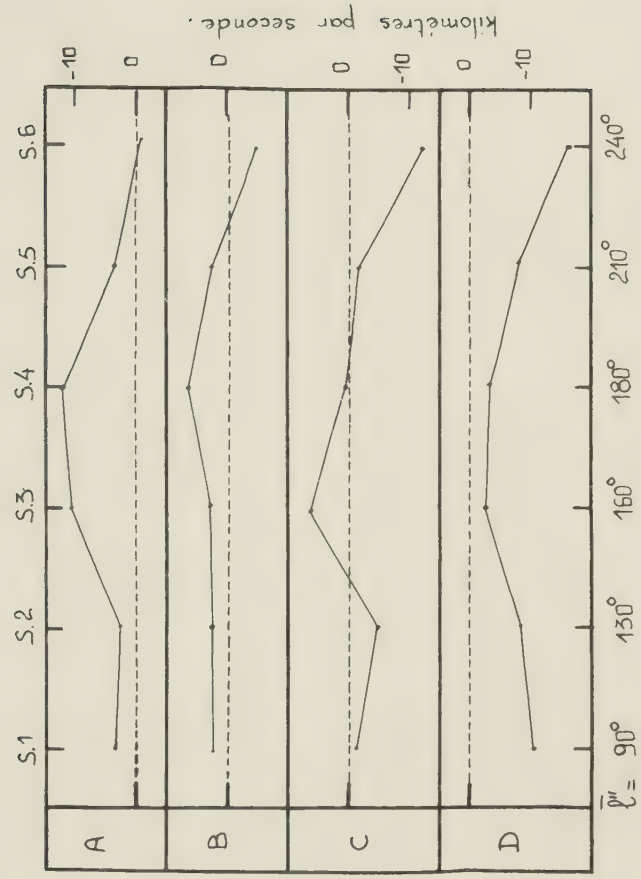


Fig. 9(b) - Moyenne des vitesses radiales $R_c$ du G. C. R. V. en fonction de la longitude.

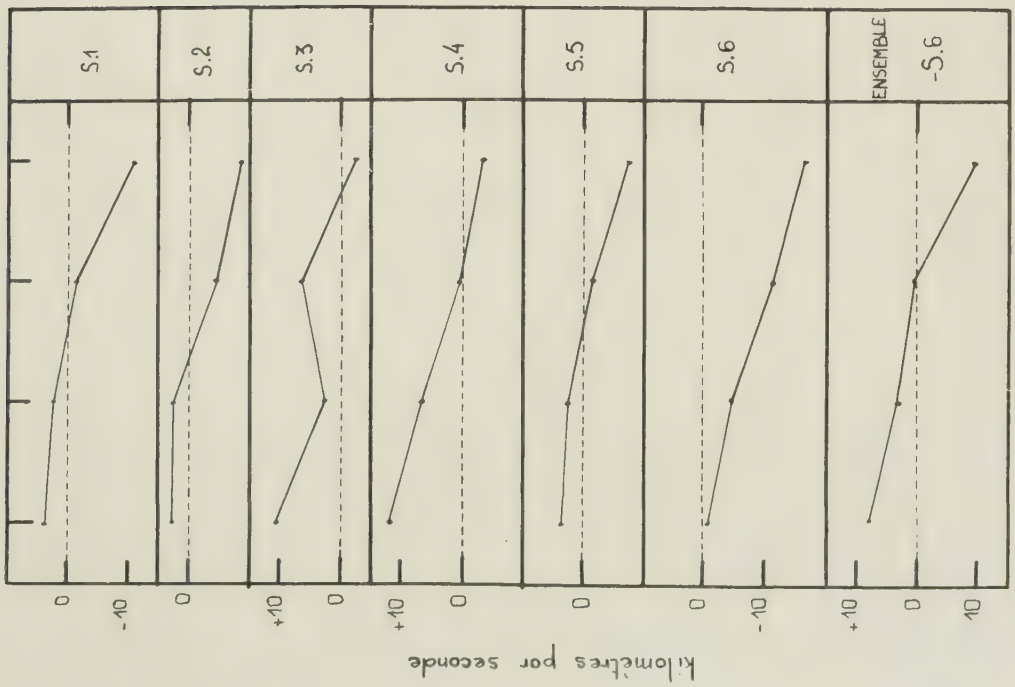


Fig. 9(a) - Moyenne des vitesses radiales $R_c$ du G. C. R. V. en fonction de la qualité des vitesses.

d'autre part,ont échoué. Les paramètres suivants ont été considérés : distance, magnitude apparente, magnitude absolue visuelle et bolométrique (liée à la masse de l'étoile), type spectral, classe de luminosité et excès de couleur.

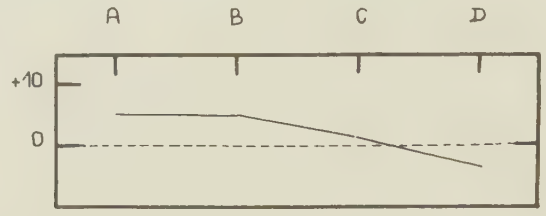


Fig. 10 - Moyenne des vitesses radiales de l'O. H. P. en fonction de la qualité des vitesses (S. 1 + S. 2 + S. 3).

Tableau 6

| groupe / secteur | A | B | C | D |
|---|---|---|---|---|
| S. 1 | + 3,3 ± 2,1 | + 2,1 ± 1,0 | - 1,5 ± 2,6 | - 10,4 ± 6,3 |
| S. 2 | + 2,4 ± 3,7 | + 2,1 ± 1,8 | - 4,6 ± 3,9 | - 8,7 ± 18,7 |
| S. 3 | + 10,4 ± 4,1 | + 2,8 ± 2,6 | + 6,1 ± 3,2 | - 2,3 ± 8,0 |
| S. 4 | + 12,0 ± 6,0 | + 6,8 ± 2,8 | + 0,5 ± 1,5 | - 3,3 ± 7,8 |
| S. 5 | + 3,7 ± 3,4 | + 2,2 ± 2,5 | - 1,1 ± 2,4 | - 7,5 ± 6,7 |
| S. 6. | - 0,5 ± 7,0 | - 4,8 ± 2,2 | - 11,7 ± 3,2 | - 16,1 ± 9,6 |
| Ensemble -S. 6 | + 8,1 | + 3,4 | + 0,2 | - 9,2 |
| n | 31 | 159 | 138 | 35 |

Moyenne des vitesses radiales $R_c$ pour chaque groupe de qualité et pour chaque secteur. $R_c$ est la vitesse radiale corrigée du mouvement du soleil et de la rotation galactique.

On constate aussi que les moyennes des vitesses radiales des étoiles des groupes A et B varient avec le secteur considéré, donc avec la longitude. Cet effet est très net pour les étoiles du groupe A qui, nous l'avons déjà signalé, sont proches du soleil. Nous verrons au chapitre III que cet effet peut être rattaché à l'existence d'une anomalie dans la distribution spatiale des étoiles O et B : le Groupe Local. L'interprétation qui en sera alors proposée permettra en outre de donner une explication d'une partie de la corrélation constatée entre les vitesses radiales et leur qualité.

On constate enfin que les étoiles du secteur 6 conduisent à des résultats assez éloignés des autres secteurs (sauf peut-être pour les étoiles du groupe A). De plus, l'écart-type de la distribution des vitesses individuelles est considérable, de l'ordre de 20 km. $s^{-1}$ pour l'ensemble de ces étoiles. Cela est dû, semble-t-il, à la présence d'un nombre encore trop important d'étoiles dont la vitesse a été déterminée à l'Observatoire Lick (voir page 255). L'application d'une correction systématique à l'ensemble de ces vitesses serait arbitraire puisque l'écart systématique décelé

par Feast et Thackeray (1958) n'intéresse probablement qu'une fraction (inconnue) de ces étoiles. Un doute planera toujours sur les études et les déterminations effectuées en utilisant les vitesses radiales de ce secteur. Pour cette raison, nous avons préféré l'éliminer de toutes les études qui vont suivre.

La vitesse radiale moyenne des étoiles des 5 premiers secteurs et le nombre de ces étoiles sont respectivement inscrits dans l'avant dernière et la dernière ligne du tableau 6.

Les étoiles dont la vitesse radiale a été déterminée à l'Observatoire de Haute Provence couvrent une trop faible partie de la région étudiée pour qu'une variation très nette de la vitesse avec la longitude puisse être reconnue à l'aide de ces seules étoiles. En revanche, l'effet systématique en fonction de la qualité des vitesses est encore décelable bien qu'il soit peut-être un peu moins marqué que pour les vitesses radiales du GCRV. Nous donnons dans la première ligne du tableau 7 la moyenne des vitesses radiales $R_c$ de chacun des groupes A, B, C, D, pour les étoiles des 3 secteurs S. 1, S. 2, S. 3, dans lesquels les déterminations de l'Observatoire de Haute Provence sont les plus nombreuses. La distance moyenne de chaque groupe est indiquée dans la 3ème ligne. On voit que ces distances moyennes sont très voisines et que par conséquent aucun effet de distance ne peut être décelé.

Tableau 7

| groupe | A | B | C | D |
|---|---|---|---|---|
| S. 1 + S. 2 + S. 3 | + 6,0 | + 6,2 | + 1,3 | - 3,5 |
| n | 42 | 54 | 65 | 31 |
| distance moyenne en pc. | 440 | 450 | 500 | 450 |

Moyenne des vitesses radiales $R_c$ déterminées à l'Observatoire de Haute Provence en fonction de la qualité.

Comme il a déjà été signalé, les résultats obtenus au chapitre III permettront d'expliquer une partie de la corrélation qui vient d'être observée. L'intégralité de celle-ci n'étant pas expliquée pour autant, on peut être tenté de déterminer un système de corrections éliminant cette corrélation. Il semble cependant que, tant qu'une explication logique n'aura pas permis de rendre compte de la totalité de l'effet décelé, d'en préciser les limites et, le cas échéant, de reconnaître les étoiles qui en sont responsables, l'application de telles corrections sera arbitraire et comportera plus de risques que d'avantages.

Aucune correction n'ayant été appliquée, il sera nécessaire de tenir compte de la possibilité d'une extension de cet effet aux étoiles lointaines, lors de l'interprétation des résultats obtenus.

## COMPOSITION DEFINITIVE DU MATERIEL ETUDIE

En résumé, et compte tenu des remarques qui viennent d'être faites au cours de ces premières pages, l'étude des propriétés cinématiques des étoiles O et B et des supergéantes de type AO, A1, A2 dont il sera rendu compte dans le deuxième chapitre, sera limitée aux étoiles de notre catalogue situées à moins de 3 kiloparsecs du soleil et dont les coordonnées galactiques $l''$ et $b''$ sont respectivement comprises entre 75° et 225° d'une part et -15° et +15° d'autre part.

# CHAPITRE II

# ETUDE DES PROPRIÉTÉS CINÉMATIQUES DES ÉTOILES O ET B

## EFFETS DU MOUVEMENT DU SOLEIL ET DE LA ROTATION GALACTIQUE DIFFERENTIELLE SUR LES VITESSES RADIALES

### EFFET DU MOUVEMENT DU SOLEIL -

Soit OXYZ un système d'axes dont l'origine O, située à la distance $\varpi_o$ du centre C de la Galaxie, décrit dans ce plan une circonférence de centre C avec une vitesse angulaire $\omega_o$. L'origine O de ce système est confondue, à l'instant considéré, avec la position S du soleil et ses axes ont pour directions :

| | | |
|---|---|---|
| axe OX | $l'' = 180°$ | $b'' = 0°$ |
| axe OY | $l'' = 90°$ | $b'' = 0°$ |
| axe OZ | | $b'' = +90°$ |

Désignons par $U_o$, $V_o$, $W_o$, les composantes de la vitesse du soleil suivant les directions OX, OY et OZ et considérons dans la direction $\Delta$, de vecteur unitaire $\vec{u}$, de longitude $l''$ et de latitude $b''$, une étoile E supposée au repos par rapport au repère OXYZ. La vitesse radiale $R_s$ de cette étoile mesurée par un observateur lié au soleil est égale à l'opposé de la projection de la vitesse S du soleil sur la direction $\Delta$ :

$$R_s = -\vec{S}.\vec{u} = U_o \cos l'' \cos b'' - V_o \sin l'' \cos b'' - W_o \sin b''. \qquad (1)$$

La détermination de la vitesse du soleil est l'un des principaux problèmes de l'Astronomie Stellaire. Les nombreuses déterminations de cette vitesse effectuées depuis bientôt deux siècles (Herschel 1783) reposent toutes sur un matériel composé essentiellement d'étoiles proches et dont, par conséquent, les vitesses individuelles sont en principe bien connues. Ce choix présente, en outre, l'avantage de réduire au minimum l'incertitude des corrections à apporter à ces vitesses pour éliminer les mouvements différentiels galactiques. On sait que ces différentes déterminations de la vitesse du soleil dépendent en particulier des caractéristiques physiques des étoiles considérées. Cette variation systématique de la vitesse du soleil en fonction des propriétés intrinsèques des étoiles est due essentiellement à un écart entre la valeur moyenne des composantes V de la vitesse des étoiles et la vitesse circulaire : le courant asymétrique, variable avec le type d'objets, l'espèce H.R. notamment quand il s'agit d'étoiles.

L'analyse des différentes déterminations de la vitesse du soleil permet de constater que les composantes $U_o$ et $W_o$ de celle-ci ne présentent aucune variation sensible avec l'espèce H.R., les fluctuations accidentelles de ces deux composantes pouvant être expliquées soit par l'échantillonnage, soit par l'incertitude des données d'observations utilisées, soit encore par la présence d'anomalies très localisées dans la distribution des vitesses des étoiles considérées (courants d'étoiles). En raison des difficultés rencontrées au chapitre précédent pour définir une composante $U_o$ stable (voir tableau 5), nous pensons qu'il est préférable d'adopter pour celle-ci la valeur la plus fréquemment admise, soit :

$$U_o = - 10 \text{ km. s}^{-1}.$$

Cette valeur n'est du reste pas très éloignée de celle que l'on déduit de l'ensemble des étoiles situées à moins de 1 000 parsecs de notre catalogue (- 10,8 km. $s^{-1}$). Nous verrons, au chapitre III, qu'elle est aussi en bon accord avec la détermination de $U_o$ déduite des vitesses spatiales des étoiles du Groupe Local.

La composante $W_o$, perpendiculaire au plan galactique, n'a que peu d'influence sur la vitesse des étoiles étudiées ici. Nous choisirons donc aussi pour cette composante la valeur la plus fréquemment rencontrée, soit :

$$W_o = + 7,0 \text{ km. s}^{-1}.$$

Le choix de la composante $V_o$ est plus délicat. Après bien des hésitations, nous avons adopté pour celle-ci la valeur :

$$V_o = + 14,0 \text{ km. s}^{-1}.$$

Cette valeur résulte d'un compromis entre la valeur 13,4 km. $s^{-1}$ déterminée par P.P. Parenago à l'aide des supergéantes de type O à B5, la valeur + 14,5 km. $s^{-1}$ trouvée par A.J. Filin (1957) pour les étoiles OB de la série principale et celle que l'on déduit des vitesses radiales des étoiles de notre catalogue situées à moins de 1 000 parsecs du soleil (+ 13,8 km. $s^{-1}$).

La vitesse du soleil ainsi définie n'est pas très différente du mouvement standard généralement utilisé :

$$U_s = - 10,4 \text{ km. s}^{-1}$$
$$V_s = + 14,8 \text{ km. s}^{-1}$$
$$W_s = + 7,3 \text{ km. s}^{-1}$$

et qui est défini par le mouvement moyen des étoiles les plus fréquentes dans les grands catalogues (les supergéantes, les géantes et les étoiles des premiers types spectraux de la série principale), c'est-à-dire, à l'aide des étoiles dont les vitesses résiduelles sont les moins dispersées.

On trouvera une étude détaillée des problèmes que pose la détermination de la vitesse du soleil dans un article de J. Delhaye (1964), article auquel nous avons emprunté la majeure partie de notre information.

## EFFET DE LA ROTATION GALACTIQUE DIFFERENTIELLE -

Soit $\omega$ la vitesse angulaire du mouvement circulaire d'une étoile située dans le plan galactique à la distance $\varpi$ du centre C de la Galaxie. Un calcul simple, trop connu pour être reproduit ici, montre que la vitesse radiale de cette étoile mesurée par un observateur situé dans le plan galactique et lié au trièdre OXYZ précédemment défini (page 270), est :

$$R_g = \varpi_o \, (\omega - \omega_o) \sin l'' \qquad (2)$$

($\omega$ est ici compté positivement dans le sens de la rotation galactique).

La vitesse de rotation variant lentement avec la distance $\varpi$, on développe généralement la différence $\omega - \omega_o$ en fonction de $\varpi - \varpi_o$. Ce développement, limité au second ordre s'écrit :

$$\omega - \omega_o = \omega_o' \, (\varpi - \varpi_o) + \frac{1}{2} \, \omega_o'' \, (\varpi - \varpi_o)^2, \qquad (3)$$

$\omega_o'$ et $\omega_o''$ désignant les dérivées première et seconde de $\omega$ par rapport à $\varpi$, calculées pour $\varpi = \varpi_o$.

On pose conventionnellement :

$$\omega_o' = -\frac{2A}{\varpi_o}. \tag{4}$$

L'analyse des déterminations radioastronomiques de la vitesse de rotation des nuages d'hydrogène neutre situés à différentes distances $\varpi$ (inférieures à $\varpi_o$) du centre C de la Galaxie a conduit M. Schmidt (1956) à proposer pour cette vitesse l'expression :

$$\omega = \sqrt{P + Q\varpi^{-1}}, \tag{5}$$

P et Q étant deux constantes que l'on peut aisément exprimer en fonction des constantes A et B de Oort.

L'expression (5) permet alors d'exprimer $\omega_o''$ en fonction de ces constantes. On a, en effet :

$$\omega_o' = -\frac{Q}{2\,\omega_o\,\varpi_o^2} = -\frac{2A}{\varpi_o},$$

puis

$$\omega_o'' = -\omega_o'\left(\frac{2}{\varpi_o} + \frac{\omega_o'}{\omega_o}\right) = -\frac{4AB}{\omega_o\,\varpi_o^2} \tag{6}$$

avec

$$\omega_o = A - B.$$

Compte tenu de (3), la vitesse radiale $R_g$ s'écrit alors :

$$R_g = -2A\,(\varpi - \varpi_o)\left[1 + \frac{B}{\omega_o\,\varpi_o}\,(\varpi - \varpi_o)\right]\sin l''. \tag{7}$$

Les constantes $\varpi_o$, A et B entrant dans cette expression sont encore mal connues. Si l'on adopte pour celles-ci les valeurs récemment recommandées par l'Union Astronomique Internationale (1963) :

$$A = +15 \text{ km.s}^{-1}\text{kpc}^{-1}$$
$$B = -10 \text{ km.s}^{-1}\text{kpc}^{-1}$$
$$\varpi_o = 10 \text{ kpc},$$

le coefficient $B/\omega_o\,\varpi_o$ est égal à $-0,040$ kpc$^{-1}$.

Le choix des valeurs des constantes utilisées pour calculer ce coefficient est en partie arbitraire. L'ancien système adopté était :

$$A = 17,5 \text{ km.s}^{-1}\text{kpc}^{-1}$$
$$B = -7,5 \text{ km.s}^{-1}\text{kpc}^{-1}$$
$$\varpi_o = 8,2 \text{ kpc}.$$

Si l'on utilise ces valeurs, le coefficient $B/\omega_o\,\varpi_o$ reste pratiquement inchangé et l'on peut s'assurer facilement que tout choix des valeurs de A, $\omega_o$ et $\varpi_o$ parmi les deux systèmes conduit pour ce coefficient à des nombres compris entre $-0,050$ et $-0,030$. On peut en déduire qu'en adoptant :

$$\frac{B}{\omega_o\,\varpi_o} = -0,040 \text{ kpc}^{-1},$$

l'erreur commise sur $R_g$ sera inférieure à :

$$\left|2A\,(\varpi - \varpi_o)^2 \sin l'' \times 10^{-2}\right|$$

Dans l'intervalle de longitude considéré ($75° < l'' < 225°$), ce terme est maximal pour $l'' = 138°$ et 222°, pour une étoile située à 3 000 parsecs du soleil. Sa valeur est alors égale à 0,08 A, soit : 1,4 km. $s^{-1}$, si l'on adopte la plus grande valeur de A, soit 17,5 km. $s^{-1}kpc^{-1}$. Inversement, l'erreur relative entraînée sur la constante A (supposée déterminée à l'aide d'une seule étoile) par l'incertitude de ce coefficient est :

$$\frac{dA}{A} \# - (\varpi - \varpi_o)\, d\left(\frac{B}{\omega_o\, \varpi_o}\right)$$

En se plaçant dans les mêmes conditions que précédemment ($l'' = 138°$, r = 3 000 parsecs), c'est-à-dire, en considérant une étoile dont le poids est maximal dans une détermination globale de A, on trouve :

$$\left|\frac{dA}{A}\right| < 0,025.$$

Cette erreur, introduite de ce fait, est donc inférieure à l'incertitude des déterminations de la constante A.

La distance héliocentrique et la longitude $l''$ de l'étoile étant données par l'observation, la distance $\varpi$ de l'étoile au centre de la Galaxie est calculable par la relation :

$$\varpi^2 = \varpi_o^2 + r^2 - 2\, r\, \varpi_o \cos l'' \qquad (8)$$

En général, pour éviter ce calcul, on développe la différence $\varpi - \varpi_o$ en fonction de r :

$$\varpi - \varpi_o = - \cos l''.r + \frac{\sin^2 l''}{2\,\varpi_o} r^2 + \frac{\sin^2 l'' \cos l''}{2\,\varpi_o^2} r^3 + \ldots \qquad (9)$$

et on limite ce développement au terme en $r^2$. La vitesse radiale $R_g$ s'écrit alors :

$$R_g = Ar \sin 2l'' - A \sin l'' \left[\sin^2 l'' + \frac{2B}{\omega_o} \cos^2 l''\right] \frac{r^2}{\varpi_o}, \qquad (10)$$

le terme du troisième ordre négligé étant :

$$- A \sin^3 l'' \cos l'' \left(1 - \frac{2B}{\omega_o}\right) \frac{r^3}{\varpi_o^2}.$$

Ce terme est maximal pour $l'' = 120°$ et 240°. Pour une étoile située à 3 000 parsecs dans l'une de ces deux directions, il est égal à $\pm 2,4$ km. $s^{-1}$. Il est alors du même ordre de grandeur que le terme $-\frac{2ABr^2}{\omega_o\, \varpi_o} \sin l'' \cos^2 l''$ provenant de la dérivée seconde $\omega_o''$ et figurant dans la relation (10), ($\pm 2,4$ km. $s^{-1}$).

On voit donc que l'équation (10) constitue une approximation insuffisante, le premier terme négligé pouvant être comparable en grandeur au second des termes en $r^2$. On perd donc ainsi l'avantage présenté initialement par l'introduction du terme fonction de $\omega_o''$ dans l'équation (3).

La relation (7) semble donc devoir être préférée à la relation (10) si le matériel étudié contient des étoiles lointaines. Le seul avantage de cette dernière relation réside dans la simplicité relative des calculs auxquels elle conduit. Cependant, cet avantage disparaît si l'on a pris soin de construire une table des quantités $(\varpi - \varpi_o)$ et $(\varpi - \varpi_o) \sin l''$ en fonction de la distance r et de la longitude $l''$, les pas de cette table étant suffisamment petits pour permettre une interpolation rapide et précise des quantités tabulées. Dans la table que nous avons construite, l'argument r a été remplacé par le module de distance $(m_o - M)$ variant de 0,1 m en 0,1 m ; son interpolation se réduit donc à celle d'une table à simple entrée.

En toute rigueur, pour une étoile qui n'est pas située dans le plan galactique, la distance r de celle-ci doit être remplacée par sa projection ($r \cos b''$) sur le plan galactique et le module de

distance doit être corrigé en conséquence avant d'interpoler la table. Cependant, la plupart des étoiles étudiées ayant une latitude très faible (80 % de ces étoiles ont une latitude inférieure à 5°), ce raffinement est souvent illusoire.

## VALEUR ADOPTEE POUR LA DISTANCE $\varpi_o$ DU SOLEIL AU CENTRE DE LA GALAXIE -

La plupart des déterminations récentes de cette distance sont comprises entre la valeur 8,2 kpc proposée par W. Baade (1955) à partir d'une étude des céphéides à courtes périodes des amas et la valeur 10,0 kpc recommandée par l'Union Astronomique Internationale (1963). Cette dernière valeur résulte à la fois de l'analyse des vitesses radiales maximales des nuages d'hydrogène neutre permettant l'évaluation du produit A $\varpi_o$ et de la détermination directe de A effectuée par R.P. Kraft et M. Schmidt (1963) à l'aide des vitesses radiales des céphéides.

Pour la présente étude, entreprise avant la publication de cette recommandation, nous avons adopté la valeur :

$$\varpi_o = 8,2 \text{ kpc}$$

proposée par W. Baade.

En fait, comme nous allons le montrer, l'évaluation de la vitesse radiale $R_g$ (relation 7) est peu sensible au choix de cette constante. Pour simplifier l'écriture, désignons par C le coefficient de - 2A dans la relation (7) :

$$C = (\varpi - \varpi_o)\left[1 + \frac{B}{\omega_o \varpi_o}(\varpi - \varpi_o)\right] \sin l'' \qquad (11)$$

et par $C_{10}$ et $C_{8,2}$ les valeurs de ce coefficient calculées respectivement en prenant $\varpi_o = 10$ et $\varpi_o = 8,2$ kpc. Le diagramme de la figure 11 montre l'aspect de la variation en fonction de la longitude de la différence $|C_{10} - C_{8,2}|$ pour une étoile située à 3 kpc du soleil. Cette différence présente un maximum pour $l''$ voisin de 75° et décroît rapidement de part et d'autre de cette valeur. Pour des longitudes comprises entre 130° et 230°, sa valeur absolue est inférieure à 30 parsecs, ce qui correspond à un écart inférieur à 1 km. $s^{-1}$ sur la vitesse radiale $R_g$.

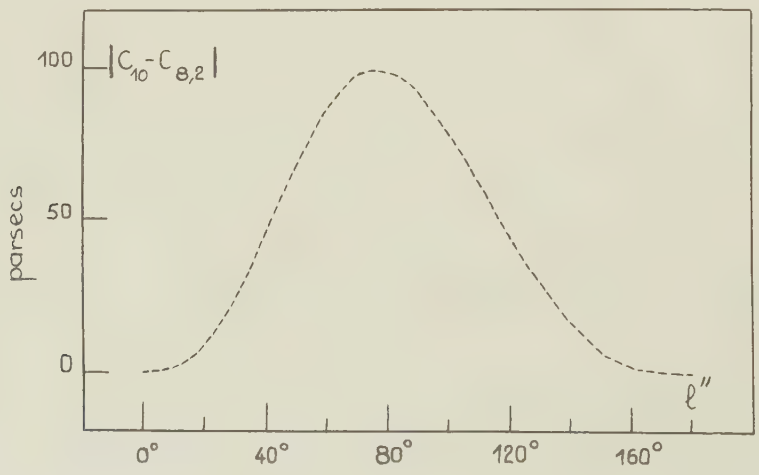


Fig. 11 - Différence des valeurs du coefficient C de - 2A (relations 7 et 11) calculées successivement pour $\varpi_o = 10$ et 8,2 kpc, la distance des étoiles étant égale à 3 kpc.

ETOILES DE LATITUDE NON NULLE -

Dans le cas où la latitude de l'étoile n'est pas négligeable, l'influence de la rotation galactique différentielle sur la vitesse radiale de celle-ci s'écrit :

$$R_g = -2A(\varpi - \varpi_o)\left[1 + \frac{B}{\omega_o \varpi_o}(\varpi - \varpi_o)\right] \sin l'' \cos b'' \qquad (12)$$

DEFINITIONS.

Dans ce qui suit, nous appellerons vitesse radiale particulière d'une étoile, la quantité :

$$R_c = R - R_s - R_g = R - R_s + 2AC \cos b'', \qquad (13)$$

$R_s$ et $R_g$ étant respectivement définis par les relations (1) et (12).

La vitesse radiale corrigée du mouvement du soleil sera désignée par la notation R' :

$$R' = R - R_s = R_g + R_c \qquad (14)$$

avec :

$$R_s = -(10 \cos l'' \cos b'' + 14 \sin l'' \cos b'' + 7 \sin b'')\ \text{km.s}^{-1} \qquad (15)$$

DETERMINATION DE LA CONSTANTE A

La valeur de la constante A de Oort a été estimée à l'aide de la relation :

$$R' + 2AC \cos b'' = R_c \qquad (16)$$

qui découle immédiatement des relations (13) et (14) et dans laquelle $R_c$ est supposé avoir le caractère d'un résidu aléatoire.

Les estimations de A par la méthode des moindres carrés pour chacun des 5 secteurs considérés figurent dans la deuxième colonne du tableau 8. Le nombre d'étoiles de chaque secteur et l'écart-type de la distribution des vitesses radiales particulières sont indiqués dans la troisième et la quatrième colonne de ce tableau.

Tableau 8

| secteur | A et son erreur-type en $\text{km.s}^{-1}\text{kpc}^{-1}$ | n | σ |
|---|---|---|---|
| S. 1 | 18,2 ± 2,8 | 226 | 16,6 |
| S. 2 | 14,6 ± 0,9 | 245 | 18,2 |
| S. 3 | 18,2 ± 1,3 | 132 | 18,9 |
| S. 4 | 1,6 ± 5,2 | 115 | 15,8 |
| S. 5 | 8,4 ± 1,4 | 121 | 14,2 |
| solution générale | 14,6 ± 0,6 | 839 | 17,1 |

Détermination de la constante A de la rotation galactique

Même si on élimine la valeur A = 1,6 km. $s^{-1}kpc^{-1}$ correspondant au secteur S.4 qui, en raison de la position de ce secteur dans le plan galactique, a un poids très faible, on constate que les estimations de cette constante sont assez dispersées. La valeur A = 8,4 km. $s^{-1}kpc^{-1}$ obtenue à l'aide des étoiles du secteur S.5 est particulièrement faible et diffère significativement de toutes les autres. C'est cependant dans ce secteur que les vitesses particulières sont les moins dispersées. Cela laisse supposer l'existence d'un effet systématique intéressant surtout les étoiles des secteurs S.4 et S.5. Nous reviendrons bientôt sur ce point.

La solution générale, obtenue en considérant les étoiles des 5 secteurs, est donnée dans la dernière ligne du tableau 8. Cette détermination est en bon accord avec celle de Kraft et Schmidt (1963) que nous avons déjà signalée (A = 15,0 km. $s^{-1}kpc^{-1}$).

Quand on détermine la constante A à l'aide des vitesses radiales des étoiles O et B, on introduit généralement dans l'équation (16) un terme supplémentaire K :

$$R' + 2AC \cos b'' - K = R_c \qquad (17)$$

L'introduction de ce terme a pour double objet d'éliminer une erreur systématique éventuelle des vitesses radiales et de tenir compte d'un mouvement d'expansion possible dans la région considérée. J. Boulon (1963) a montré que l'interprétation physique donnée à ce terme n'est pas certaine et que "les solutions obtenues en l'utilisant ne doivent pas être acceptées sans un contrôle de leur validité".

Les valeurs des A et K et celle de l'écart-type $\sigma$ des vitesses radiales déduites de l'ensemble des étoiles des 5 secteurs sont :

$$A = +14,0 \pm 0,6 \text{ km. } s^{-1}kpc^{-1}$$

$$K = +3,5 \pm 0,6 \text{ km. } s^{-1}$$

$$\sigma = 16,7 \text{ km. } s^{-1}$$

## INFLUENCE DES ERREURS DES DISTANCES DES ETOILES SUR LA DETERMINATION DE LA CONSTANTE A -

Pour étudier l'influence des erreurs des distances des étoiles sur la constante A nous adopterons successivement deux modèles : le premier représentera la distribution des erreurs de distance, le second la répartition des étoiles dans le plan galactique.

L'écart-type de la distribution des erreurs des modules de distance a été évalué au chapitre précédent : cet écart-type est égal à 0,5 unité de magnitude. La distribution observée des erreurs est symétrique. On constate qu'elle peut être convenablement représentée par la distribution simplifiée définie par le tableau 9 et dont la forme est indiquée figure 12. Il va sans dire que l'ajustement de cette distribution simplifiée à la distribution observée n'est pas rigoureux, mais cela est sans effet notable sur l'estimation que nous nous proposons d'effectuer, la condition essentielle que nous nous sommes imposée dans l'ajustement étant de conserver la valeur de l'écart-type, soit 0,5 unité de magnitude.

Pour représenter schématiquement la distribution des étoiles dans le plan galactique, nous admettrons que les étoiles contenues dans un secteur élémentaire dont l'angle au centre est très petit se répartissent en 3 groupes contenant chacun 40 étoiles et dont les dimensions sont négligeables. Ces groupes sont situés à 500 pc, 1 500 pc et 2 500 pc du soleil et sont entraînés par la rotation différentielle de la Galaxie. Nous supposerons en outre que les vitesses particulières des étoiles par rapport au centre des groupes sont négligeables.

Dans ces conditions, la vitesse radiale (corrigée du mouvement du soleil) d'une étoile quelconque appartenant à l'un de ces groupes peut être calculée par la relation 12, dans laquelle $\varpi$ désigne la distance du groupe considéré au centre C de la Galaxie.

Les erreurs sur l'évaluation des distances ont pour effet d'allonger ces groupes dans la direction radiale et la loi de variation des vitesses $R_g$ en fonction de la distance s'en trouve fortement perturbée. La variation observée est indiquée par le diagramme de la figure 13 pour un sec-

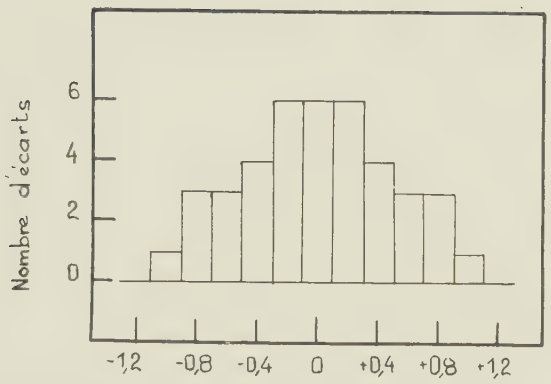


Fig. 12 - Distribution schématique des erreurs de l'évaluation des modules de distance.

Tableau 9

| écart | nombre d'étoiles |
|---|---|
| 0 | 6 |
| ± 0,2 | 6 |
| ± 0,4 | 4 |
| ± 0,6 | 3 |
| ± 0,8 | 3 |
| ± 1,0 | 1 |
| Nombre total d'étoiles : 40 | |

Distribution simplifiée des erreurs des modules de distance.

teur élémentaire dont la longitude moyenne $l''$ = 138° correspond sensiblement à la direction dans laquelle l'effet de la rotation différentielle est maximal. Les vitesses radiales ont été calculées en prenant A = 15 km. $s^{-1}kpc^{-1}$. Les petits cercles indiquent la position théorique des centres des trois groupes et les croix la position évaluée. On remarquera la dissymétrie de la répartition des étoiles de chaque groupe par rapport à la position évaluée du centre.

Dans l'estimation de A par la méthode des moindres carrés, cette dissymétrie joue un rôle important puisque ce sont les étoiles les plus lointaines qui ont le plus grand poids. Appliquée aux étoiles du secteur élémentaire considéré figure 13, cette méthode conduit à :

$$A = 13,8 \pm 0,3 \text{ km. s}^{-1}\text{kpc}^{-1}$$

la valeur adoptée initialement pour calculer les vitesses radiales étant A = 15 km. $s^{-1}kpc^{-1}$.

Le rapport de la valeur estimée à la valeur initiale est donc égal à 0,92 ; il est du reste indépendant de cette dernière valeur. De plus, la vitesse radiale $R_g$ étant sensiblement proportionnelle à la distance quel que soit le secteur élémentaire considéré dans la région que nous étudions, ce rapport est aussi pratiquement indépendant de la longitude moyenne du secteur. (Ce dernier point n'est pas tout à fait vérifié pour les directions voisines de celle de la rotation galactique, mais les étoiles situées dans ces directions ont un poids très faible dans l'estimation de A).

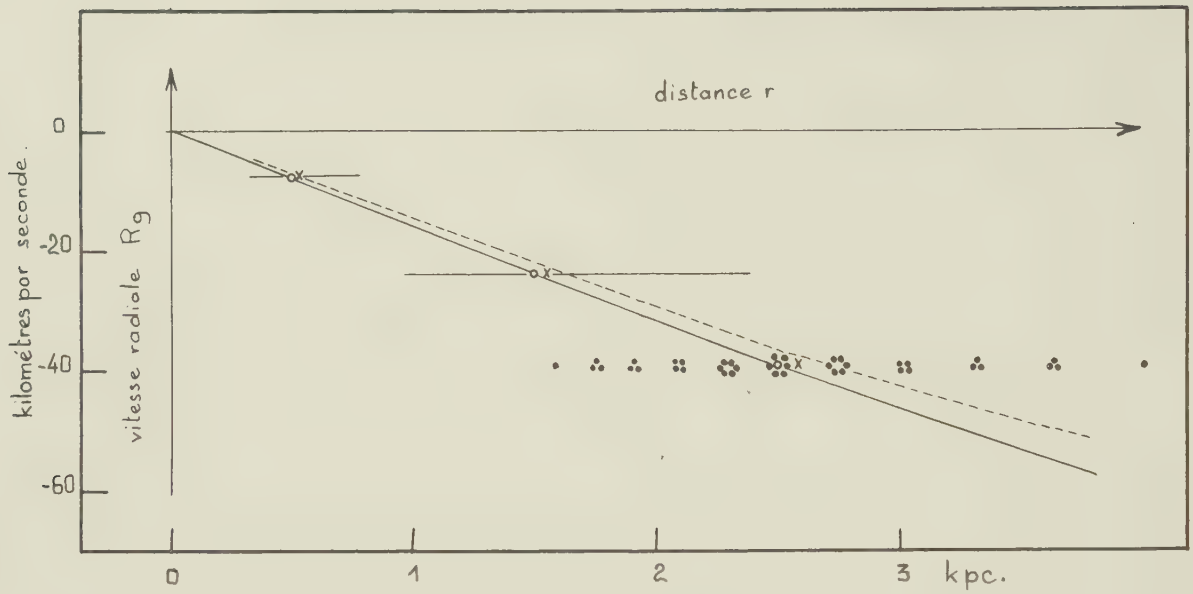


Fig. 13 - Influence des erreurs des distances calculées sur l'estimation de la constante A.

La considération de modèles plus compliqués pour représenter la distribution des erreurs sur les distances, et la répartition des étoiles dans le plan galactique, ne modifie pas sensiblement l'estimation que nous venons d'effectuer. Nous admettrons donc que l'effet des erreurs étudiées dans ce paragraphe entraîne une sous-estimation de 8 % de la valeur de A.

Compte tenu des déterminations précédentes et de leurs incertitudes, la valeur :

$$\boxed{A = +15 \text{ km. s}^{-1}\text{kpc}^{-1}}$$

recommandée par l'Union Astronomique Internationale nous paraît donc être la plus indiquée pour la suite de cette étude.

## ECARTS SYSTEMATIQUES AU MOUVEMENT CIRCULAIRE

### ETUDE PRELIMINAIRE -

Nous avons signalé plus haut (page 276) que les valeurs de la constante A estimées séparément pour les différents secteurs présentaient entre elles des écarts significatifs laissant supposer l'existence de mouvements s'ajoutant à la rotation pure, seule prise en considération dans le modèle classique (équation 16, chapitre II).

Ces mouvements ont fait l'objet d'une étude préliminaire dont les résultats ont été publiés dans une note aux Comptes Rendus de l'Académie des Sciences (M. Bonneau, 1963). Cette étude était basée sur un nombre restreint d'étoiles du GCRV et de quelques listes de vitesses radiales publiées par l'Observatoire de Haute Provence.

Les 309 étoiles retenues pour cette recherche préliminaire constituaient notre premier catalogue, établi d'une manière identique à celle qui a été décrite dans le premier chapitre de ce Mémoire pour le catalogue définitif.

Pour la réduction des vitesses radiales, le même vecteur vitesse du soleil avait été adopté, mais l'effet de la rotation galactique sur les vitesses radiales avait été éliminé en adoptant un modèle simplifié (relation 10, limitée au terme du 1er ordre en r) :

$$R_g = A\,r \sin 2l'', \tag{18}$$

Nous reproduisons, figure 14, les trois diagrammes de la figure 1 de cette note. Ces diagrammes montrent la variation des vitesses radiales $R_c$ (vitesse particulière, voir page 275) en fonction de la distance r pour les trois secteurs S. 3, S. 4, S. 5 auxquels nous avions limité notre première étude. Ces diagrammes sont construits en adoptant pour A la valeur 17,5 km. $s^{-1}kpc^{-1}$, conventionnellement admise à cette époque.

L'examen de ces diagrammes permet de constater que, d'une façon générale, les vitesses radiales $R_c$ décroissent quand r croît. Sauf dans le secteur 3, les moyennes des vitesses $R_c$ effectuées de 500 en 500 parsecs sont toutes négatives à partir de 1 000 parsecs. On constate aussi, particulièrement sur le diagramme du secteur S. 3, que la dispersion des vitesses croît avec la distance. Dans notre note, cette dernière remarque était accompagnée du commentaire suivant : "Cette dispersion des vitesses radiales est due, en partie tout au moins, à l'imprécision des modules de distance qui entraîne, pour les grandes distances, une erreur considérable sur l'évaluation de la rotation différentielle. Cette remarque s'applique particulièrement aux étoiles lointaines du secteur 3 dont l'excès de couleur par rapport aux étoiles de directions voisines, semble nettement sous-estimé". L'attention a déjà été attirée sur ce point au chapitre I.

Le gradient des vitesses $R_c$ en fonction de la distance r avait été évalué par une loi simple de la forme :

$$R_c = K + kr + \rho\,, \tag{19}$$

la quantité $\rho$ ayant le caractère d'un résidu aléatoire (vitesse radiale résiduelle).

La relation (19) écrite ci-dessus, doit être considérée comme un estimateur d'un effet moyen, sans préjuger de la formulation précise du phénomène physique présent, en particulier, de sa continuité le long de la direction explorée.

Les estimations des constantes K et k sont données dans le tableau 10 pour les trois secteurs étudiés dans cette note.

Tableau 10

| secteur | K et son erreur-type en km. $s^{-1}$ | k et son erreur-type en km. $s^{-1}kpc^{-1}$ | écart-type de $\rho$ en km. $s^{-1}$ | n |
|---|---|---|---|---|
| S. 3 | + 6,2 ± 2,6 | - 3,0 ± 1,7 | 15,7 | 106 |
| S. 4 | + 5,8 ± 2,2 | - 6,8 ± 2,4 | 14,6 | 86 |
| S. 5 | + 2,6 ± 2,1 | - 9,5 ± 1,8 | 15,4 | 117 |

La comparaison des valeurs de K et de leurs erreurs-types justifie l'introduction de cette constante dans l'estimateur (19).

Les déterminations de K et k dépendent évidemment du choix de la valeur de A, mais il faut noter qu'une valeur de A choisie de façon à annuler k dans le secteur S. 3, par exemple, l'amplifiera nécessairement dans le secteur 5 et inversement. Quoi qu'il en soit, la valeur choisie pour A était arbitraire et il nous avait paru préférable de la déterminer en faisant seulement appel aux données réunies pour cette première étude.

Cependant, les trois secteurs alors considérés recouvrent une trop faible partie du plan galactique pour que cette détermination soit justifiée.

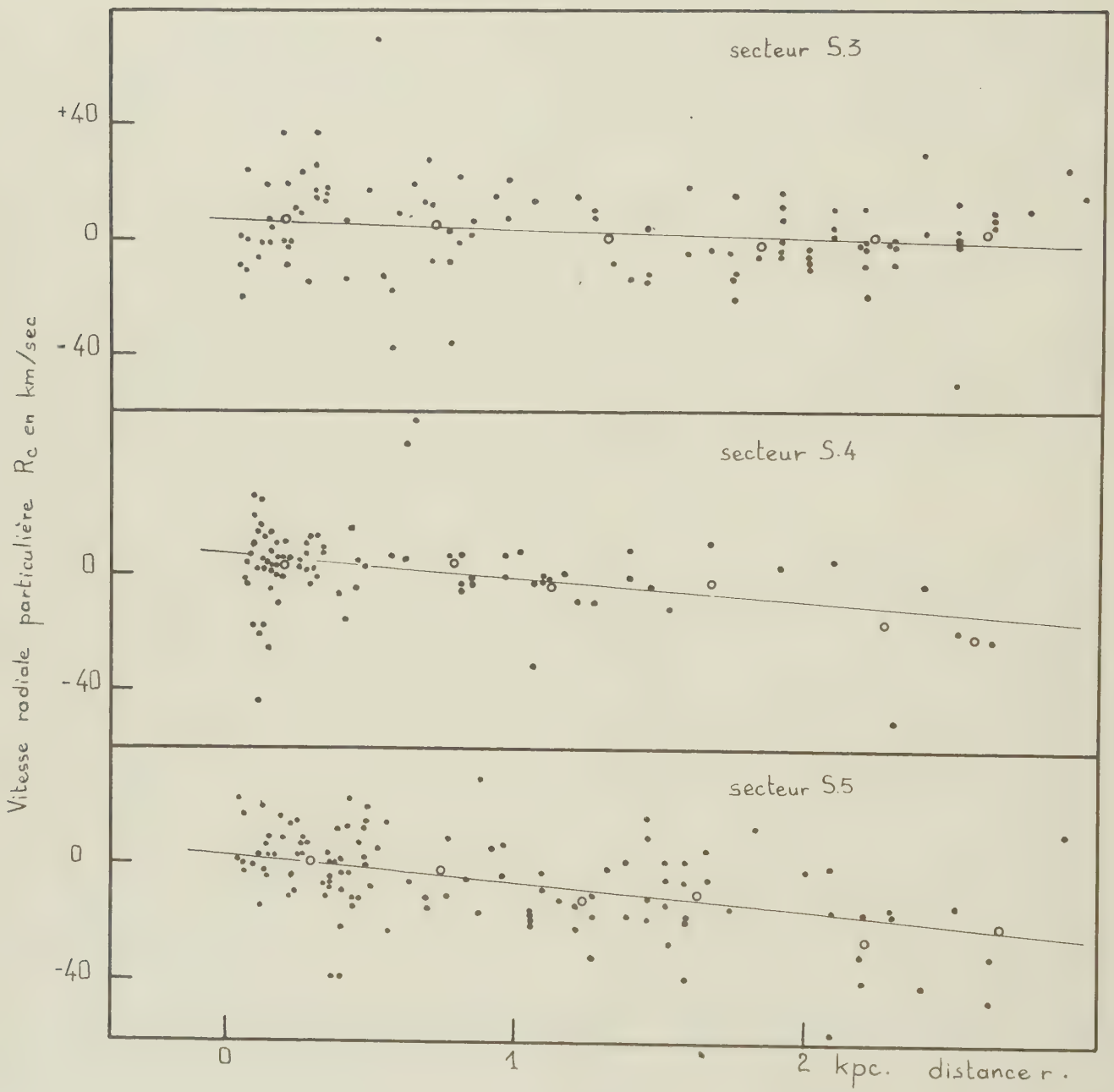


Fig. 14 - Vitesses radiales $R_c$ (A = 17,5 km. $s^{-1}$. $kpc^{-1}$) en fonction de la distance au soleil. Les petits cercles représentent les moyennes effectuées par tranche de 500 pc.

Il nous a alors paru préférable d'étendre cette première étude à d'autres régions du plan galactique. Notre intention initiale était d'étudier les vitesses radiales des étoiles O et B dans 7 secteurs égaux compris entre les directions de longitude $l^{II}$ = 75° et $l^{II}$ = 285°, c'est-à-dire répartis symétriquement par rapport à la direction de l'anticentre galactique. Nous avons vu au chapitre I que l'existence d'erreurs systématiques importantes dans les vitesses radiales du GCRV nous avait contraints de limiter nos recherches aux étoiles dont la longitude est inférieure à 225°.

Tableau 11

| secteur | K et son erreur-type en km. $s^{-1}$ | k et son erreur-type en km. $s^{-1}kpc^{-1}$ | écart-type de $\rho$ en km. $s^{-1}$ | n |
|---|---|---|---|---|
| S. 1 | + 2,1 ± 1,9 | - 3,1 ± 1,8 | 16,9 | 226 |
| S. 2 | + 2,7 ± 1,9 | + 0,1 ± 1,4 | 17,7 | 245 |
| S. 3 | + 2,6 ± 2,3 | - 2,2 ± 1,9 | 16,9 | 132 |
| S. 4 | + 5,0 ± 1,9 | - 8,4 ± 2,0 | 14,3 | 115 |
| S. 5 | + 1,5 ± 1,8 | - 6,6 ± 1,4 | 14,4 | 121 |

Ajustement de la relation : $R_c = K + kr + \rho$ aux vitesses radiales des étoiles de chaque secteur.

RESULTATS DE L'ETUDE DEFINITIVE -

L'étude que nous venons d'exposer a donc été reprise en utilisant l'ensemble des étoiles de notre catalogue situées à moins de 3 kpc du soleil, dans les cinq secteurs considérés. Comme nous l'avons précédemment signalé, l'analyse des résidus $R_c$ ne diffère pas, dans son principe, de celle qui a été décrite dans les pages précédentes. Les seules modifications importantes résident dans le choix d'une relation plus rigoureuse pour éliminer l'effet de la rotation galactique sur les vitesses radiales (relation 12, chapitre II) et l'adoption d'une valeur unique de la constante A, estimée, nous l'avons vu, de manière à représenter au mieux les propriétés cinématiques globales du matériel étudié, soit :

$$A = 15 \text{ km. s}^{-1}\text{kpc}^{-1}$$

Les variations de $R_c$ avec la distance au soleil sont représentées sur les figures 15a, 15b, ... , 15e pour les cinq secteurs retenus.

L'ajustement de la relation (19) a été effectué par la méthode des moindres carrés : il a conduit aux résultats du tableau 11.

La comparaison des valeurs indiquées dans les tableaux 10 et 11 confirme la validité des résultats préliminaires.

Si l'on considère que la relation (19) traduit une propriété cinématique du matériel étudié, le terme K peut s'interpréter comme une tendance à l'expansion pour les étoiles proches, tandis que le terme k correspondrait, au contraire, pour les étoiles lointaines, à une tendance à se rapprocher du soleil.

DISCUSSION DES RESULTATS OBTENUS -

L'attention a été attirée au chapitre I (tableaux 6 et 7) sur un effet pouvant être interprété par une erreur systématique entachant les vitesses radiales suivant leur qualité.

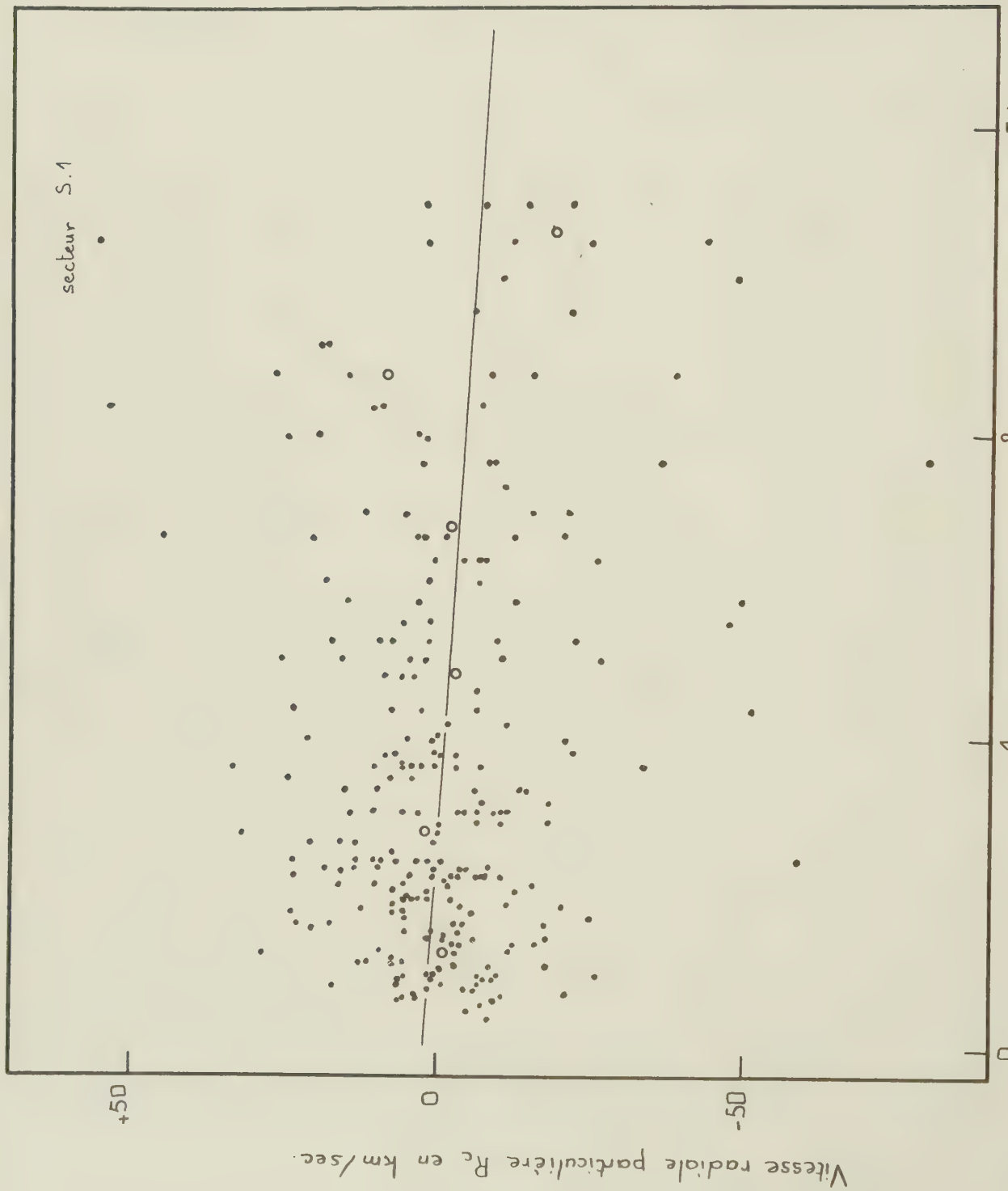


Fig. 15a - Vitesses radiales $R_c$ ($A = 15$ km. $s^{-1}$. $kpc^{-1}$) en fonction de la distance au soleil. Les petits cercles représentent les moyennes effectuées par tranche de 500 pc.

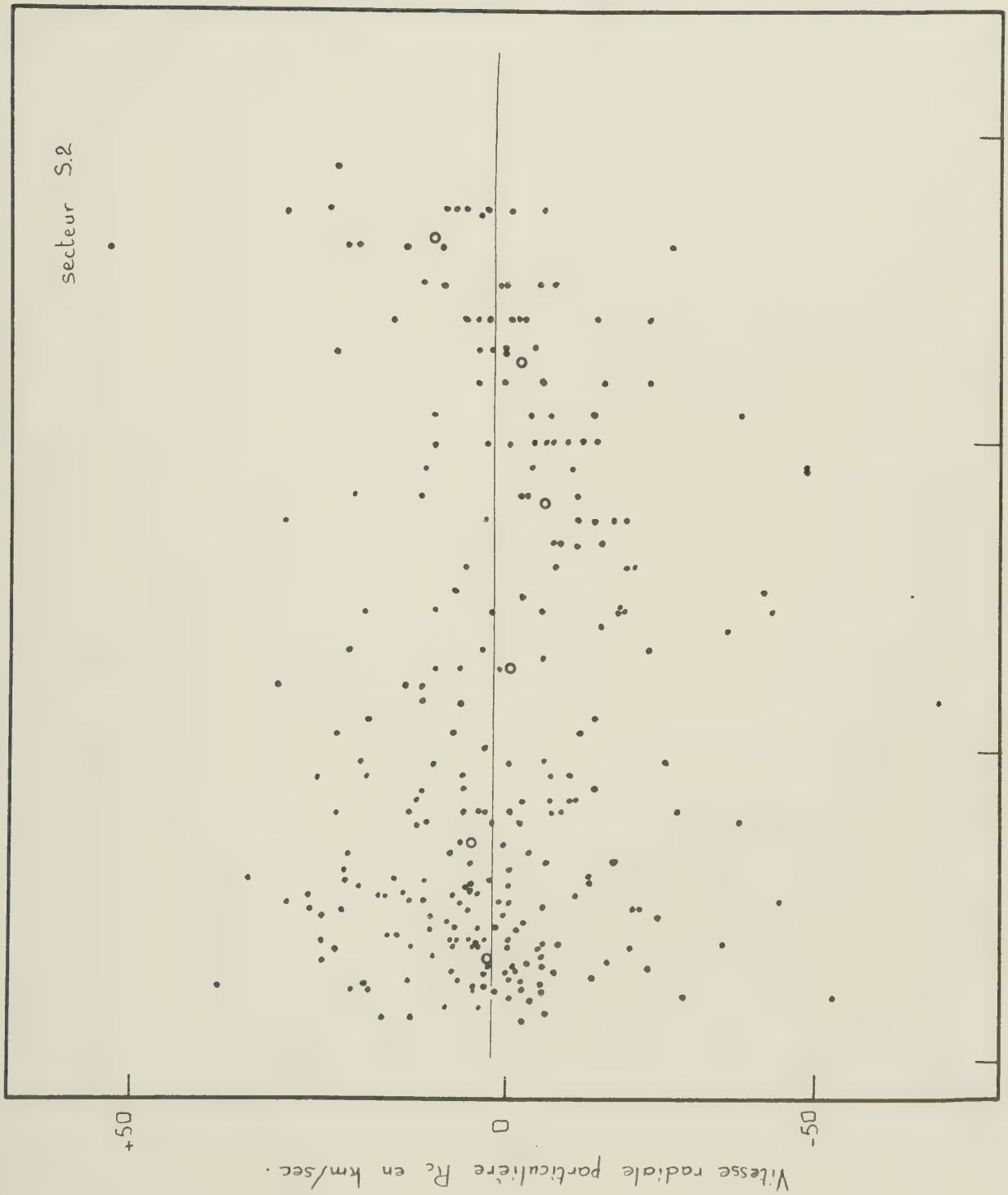


Fig. 15b - Vitesses radiales $R_c$ (A = 15 km. $s^{-1}$. $kpc^{-1}$) en fonction de la distance au soleil. Les petits cercles représentent les moyennes effectuées par tranche de 500 pc.

Fig. 15c - Vitesses radiales $R_c$ ($A = 15$ km. $s^{-1}$. $kpc^{-1}$) en fonction de la distance au soleil. Les petits cercles représentent les moyennes effectuées par tranche de 500 pc.

Fig. 15d - Vitesses radiales $R_c$ ($A = 15$ km. $s^{-1}$. $kpc^{-1}$) en fonction de la distance au soleil. Les petits cercles représentent les moyennes effectuées par tranche de 500 pc.

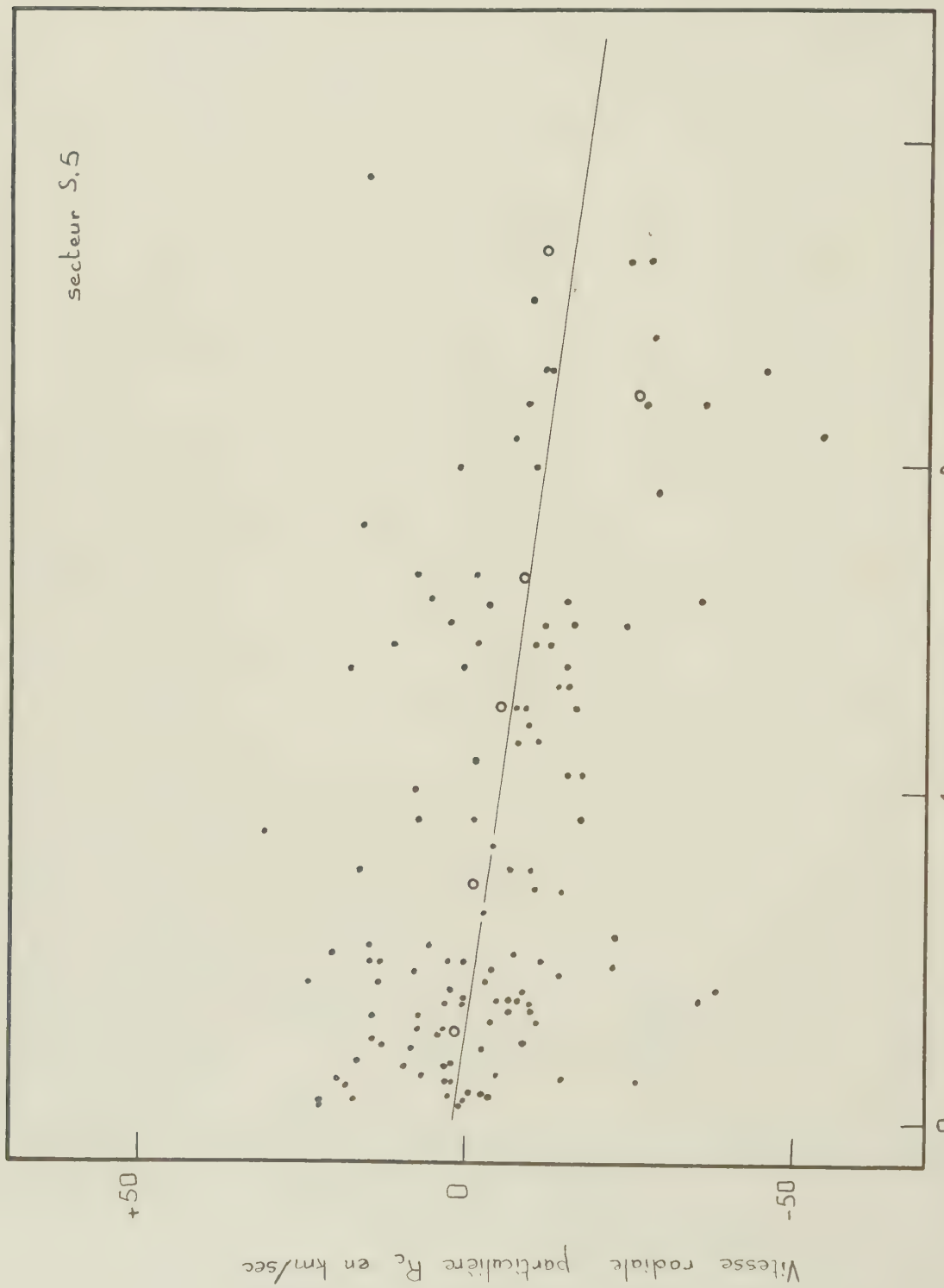


Fig. 15e - Vitesses radiales $R_c$ (A = 15 km. $s^{-1}$. $kpc^{-1}$) en fonction de la distance au soleil. Les petits cercles représentent les moyennes effectuées par tranche de 500 pc.

Le tableau 4 établissant, d'autre part, une corrélation entre la qualité de ces vitesses et la distance des étoiles au soleil, il est permis de se demander si les propriétés observées n'ont pas une origine purement métrologique.

Un calcul simple montre que, dans la mesure où il est légitime d'étendre à tout le volume exploré la corrélation mise en évidence dans les tableaux 6 et 7, le rapprochement apparent dû à des erreurs systématiques éventuelles de mesures ne représente que le cinquième du rapprochement moyen observé dans les secteurs S.4 et S.5.

Comme hypothèse de travail, nous proposons donc d'admettre la réalité physique des phénomènes observés, c'est-à-dire :

a) une tendance au rapprochement pour les étoiles lointaines (terme k),

b) une tendance à l'expansion pour les étoiles proches du soleil (terme K) ; l'existence possible d'un effet de qualité nous interdisant de proposer des valeurs numériques précises pour le gradient de vitesse dans chacun des deux cas.

Si l'on se réfère aux propriétés connues de la structure galactique au voisinage du soleil, on sait que les étoiles étudiées (qui sont des étoiles jeunes) peuvent être plus ou moins liées : aux bras spiraux de l'hydrogène interstellaire, pour les étoiles lointaines ; au système de Gould, pour les étoiles proches.

Nous nous proposons donc d'éprouver notre hypothèse de travail en étudiant successivement :

a) celles des propriétés de l'hydrogène interstellaire qui pourraient être en relation avec la tendance au rapprochement attribuée aux étoiles lointaines.

b) les propriétés cinématiques des étoiles jeunes entourant le soleil et constituant le Groupe Local dont la structure générale est caractérisée par le cercle de Gould (Gould's belt). Les résultats de cette épreuve nous ont conduits à réserver un chapitre spécial du présent Mémoire à l'examen de cette dernière question.

## MOUVEMENTS SYSTEMATIQUES DE L'HYDROGENE INTERSTELLAIRE DANS LA DIRECTION DE L'ANTICENTRE GALACTIQUE

On sait le rôle joué dans l'étude de la distribution de l'hydrogène neutre interstellaire par la réception du rayonnement radioélectrique de ce gaz sur la fréquence 1 420 MHz (longueur d'onde : 21,1 cm).

La raie observée est affectée à la fois dans sa position et dans son profil par les mouvements dont le gaz est animé. Ces mouvements se traduisent par un effet Doppler-Fizeau composite dû :

a) au mouvement circulaire des différentes sources échelonnées en distance dans la direction d'observation,

b) à l'agitation interne du gaz,

c) à d'autres mouvements systématiques éventuellement présents.

Si le seul mouvement systématique est constitué par le mouvement de rotation galactique différentielle, le décalage du centre de la raie sera nul dans la direction de l'anticentre de la Galaxie et la largeur de son profil sera alors minimale. Si, en revanche, un mouvement systématique radial vient se superposer au mouvement de rotation, la direction de l'élargissement minimal du profil diffèrera de celle de l'anticentre.

C'est précisément ce que mettent en évidence les figures 16a, 16b,..., 16i construites à l'aide des données empruntées au catalogue des profils de la raie 21 cm de C.A. Muller et G. Westerhout (1957).

Sur ces figures, nous avons porté en ordonnée, pour 9 latitudes galactiques b' différentes, la largeur de la raie observée dans chacune des directions correspondant à la longitude l' figurant en abscisse. Les points placés entre parenthèses correspondent à des valeurs mal définies de la largeur du profil.

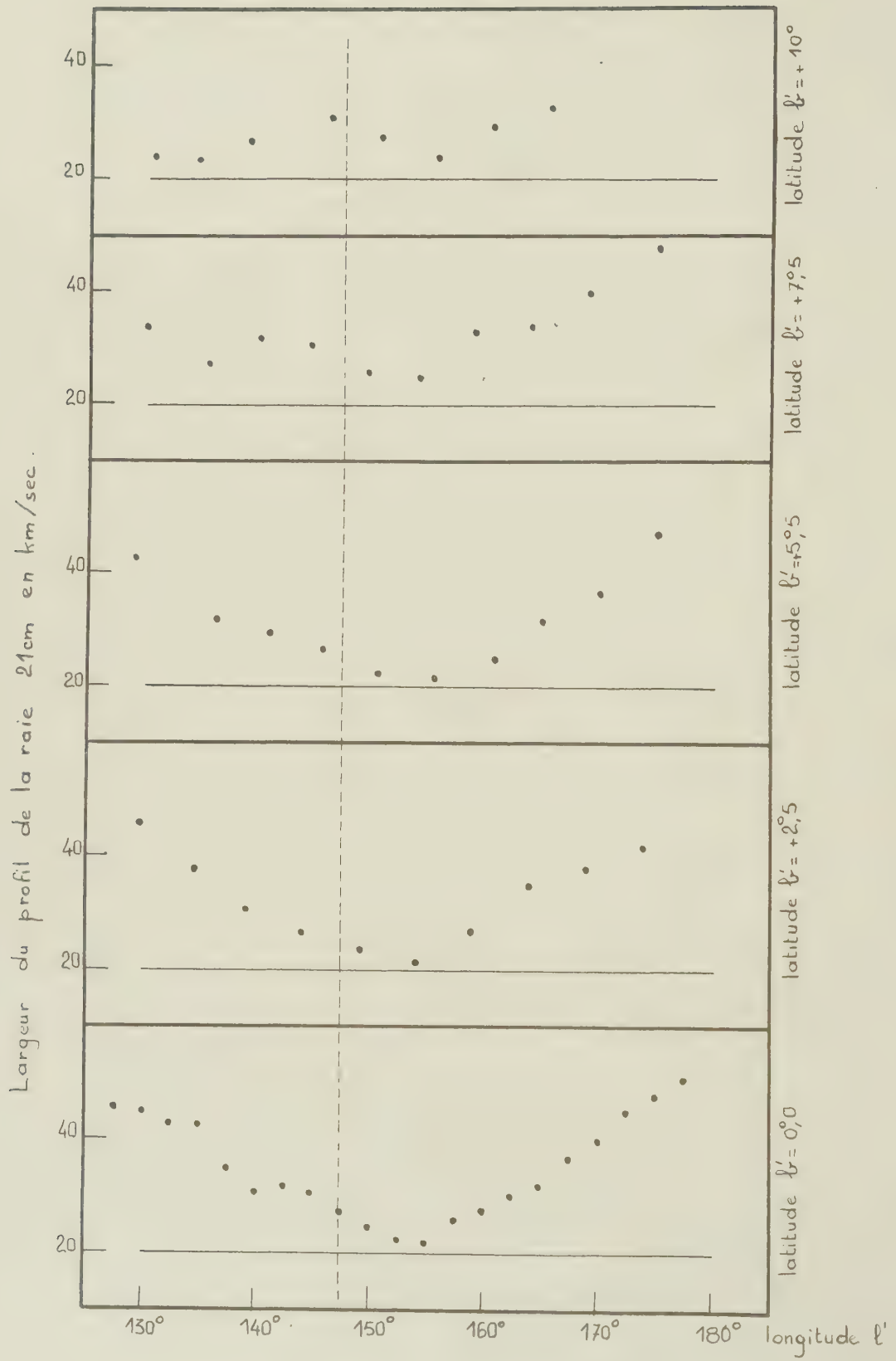


Fig. 16a, 16b, 16c, 16d, 16e.

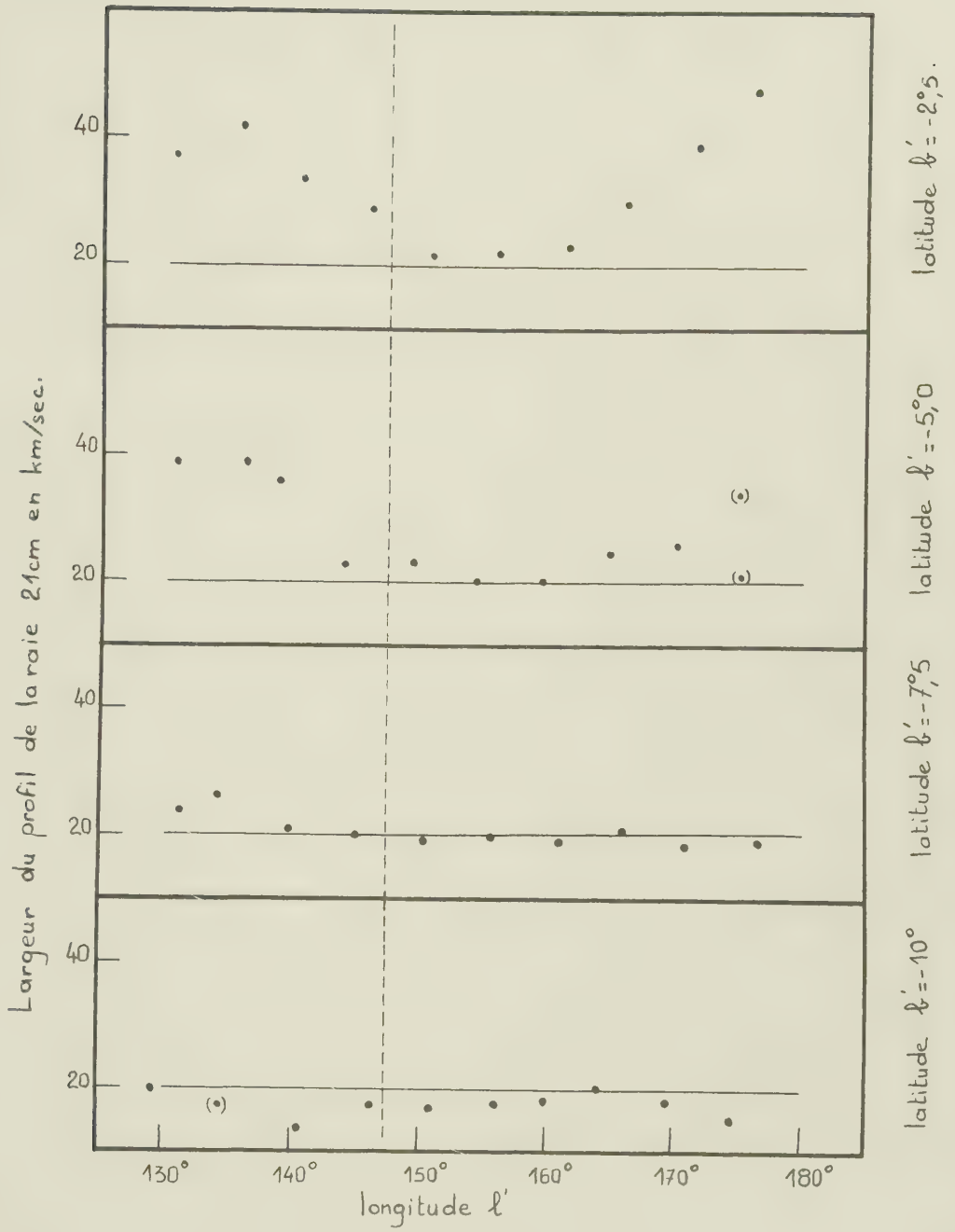


Fig. 16f, 16g, 16h, 16i - Variation de la largeur du profil de la raie 21 cm.

ESTIMATION DU TERME k POUR L'HYDROGENE -

Si l'on considère d'abord les figures 16e et 16d correspondant aux latitudes b' = 0° et b' = + 2°5, c'est-à-dire, à deux ensembles de directions symétriques l'un de l'autre par rapport au plan galactique réel (si l'on tient compte des erreurs qui entachent le pôle d'Ohlsson), on constate que, pour ces deux latitudes, la largeur minimale du profil de la raie 21 cm se situe dans une direction comprise entre $l'$ = 154° et $l'$ = 155°. Cette direction fait donc avec celle de l'anticentre un angle d'environ 7°.

Supposons que le gaz soit animé d'un mouvement radial analogue à celui qui vient d'être décelé pour les étoiles O et B et considérons les nuages d'hydrogène situés à la même distance r du soleil, dans une direction voisine de celle de l'anticentre. La vitesse radiale observée (corrigée du mouvement du soleil) s'écrira, en limitant au 1er ordre en r le développement des termes de rotation (relation 10) :

$$R' = Ar \sin 2l'' + kr.$$

Cette vitesse s'annule donc pour :

$$k = - A \sin 2l''.$$

Cette relation nous fournit donc un moyen d'estimer k.

Dans le cas présent elle conduit à :

$$k = - 3,6 \text{ km.s}^{-1}\text{kpc}^{-1},$$

pour A = 15 km.s$^{-1}$kpc$^{-1}$.

La valeur moyenne de k, déduite des étoiles O et B du catalogue situées entre les longitudes $l''$ = 160° et $l''$ = 205° (correspondant sensiblement à l'intervalle de longitude dans lequel la variation du profil de la raie 21 cm a été étudiée) est :

$$k = - 6,2 \pm 1,2.$$

Si l'on admet donc que 20 % ou 25 % de cette quantité correspondent à un rapprochement apparent d'origine purement métrologique, on peut estimer que les deux valeurs du gradient de vitesse k présentent entre elles un accord satisfaisant, favorable à l'hypothèse de la réalité du mouvement systématique radial supposé.

DISTRIBUTION DE L'HYDROGENE INTERSTELLAIRE -

La variation de la largeur du profil de la raie 21 cm avec la longitude et le décalage de sa valeur minimale par rapport à la direction de l'anticentre sont encore nettement observables sur les figures 16c, 16f qui correspondent à des directions faisant un angle de 4° environ avec le plan galactique réel. Dans les quatre figures où ces effets sont observés, le taux de variation de la largeur du profil est sensiblement le même, soit environ : 1 km.s$^{-1}$ par degré (60 km.s$^{-1}$ par radian).

En revanche, ces deux effets ne se retrouvent plus sur les figures 16a, 16b, 16g, 16h, 16i.

Ces constatations ne sont pas incompatibles avec une répartition quasi uniforme de l'hydrogène dans un disque d'épaisseur approximativement constante. Mais, étant donné ce que l'on sait de la structure spirale de la répartition de ce gaz au voisinage du plan galactique, elles s'interprètent mieux en admettant que les deux effets présents dans les figures 16c, 16d, 16e et 16f sont dus au mouvement de rapprochement d'un bras spiral particulier que nous allons essayer de situer.

Pour cela, nous admettrons que, dans les directions proches de l'anticentre la répartition de l'hydrogène peut être représentée schématiquement par deux bras spiraux. Le premier de ces bras est situé dans le voisinage immédiat du soleil et la variation de sa vitesse radiale corrigée du mouvement du soleil est par conséquent négligeable. La vitesse radiale du bras le plus éloigné résulte à la fois de la rotation galactique et d'un mouvement de rapprochement.

Si l'on admet, d'autre part, que les intensités observées des profils de la raie 21 cm de chacun des deux bras sont sensiblement égales et que la vitesse d'agitation du gaz est la même quel que soit le bras considéré, la largeur L, du profil de la raie observée dans une direction voisine de l'anticentre, est approximativement (voir figure 17) :

$$L = \lambda + Ar \sin 2l'' + R_c ,$$

$\lambda$ étant la largeur des profils de chacun des deux bras et $R_c$ la vitesse radiale du mouvement particulier du bras situé à la distance r du soleil.

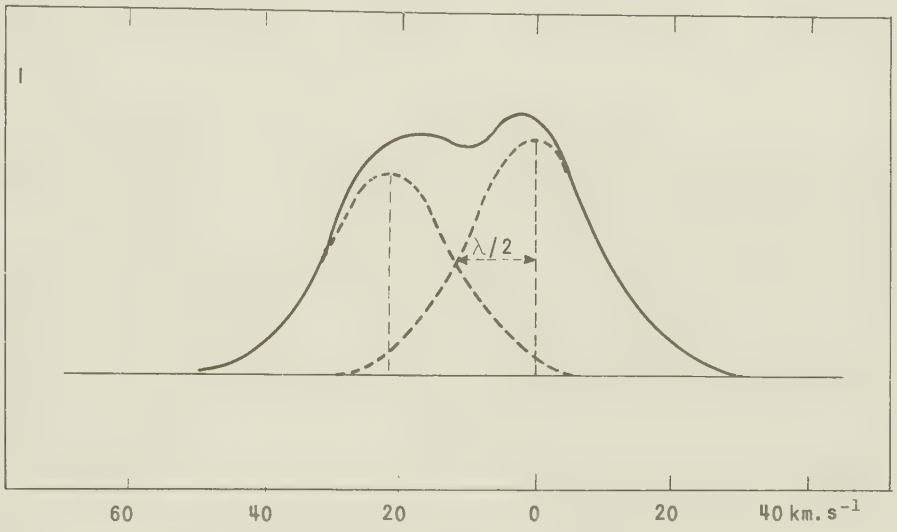


Fig. 17 - Largeur du profil de la raie 21 cm (distribution schématique de l'hydrogène).

La variation de la largeur L du profil observé avec la longitude est :

$$\frac{dL}{dl''} = 2Ar \cos 2l'' \# 2Ar$$

$$\left(\frac{dr}{dl''} = 0, \text{ dans la direction de l'anticentre}\right).$$

L'examen des figures correspondant aux basses latitudes nous a fourni :

$$\frac{dL}{dl''} \# 60 \text{ km.s}^{-1} \text{ par radian},$$

on en déduit :

$$r \# 2 \text{ kpc}$$

(dans la direction de l'anticentre).

La distance du bras étant (grossièrement) estimée, on peut alors évaluer son épaisseur. En effet, si l'on considère que la disparition des deux effets constatés sur les figures 16c, 16d, 16e, 16f se situe au voisinage de la latitude $|b''| = 5°$, la demi-épaisseur e du bras est égale à :

$$e = r \text{ tg } 5° = 170 \text{ parsecs}$$

Compte tenu des incertitudes de l'évaluation de la distance et de la latitude à partir de laquelle la variation du profil n'est plus observable, on peut considérer que l'épaisseur ainsi trouvée est très acceptable.

DISTRIBUTION DES ETOILES O ET B -

Si l'on se réfère maintenant aux figures 15a, 15b, 15c, 15d, 15e dans lesquelles la répartition des points est fortement perturbée par les erreurs affectant les distances, on constate qu'il est tout à fait raisonnable de penser que les points appartiennent principalement à deux accumulations, l'une proche de l'origine, l'autre à une distance qui dépend du secteur considéré mais qui semble se situer entre 1,5 et 2,5 kpc dans la direction de l'anticentre. Notons que, dans le schéma classique généralement adopté pour décrire la structure de la répartition des étoiles O et B, le bras spiral que nous venons de situer correspond à la position du bras de Persée.

# CHAPITRE III

# ETUDE DES PROPRIÉTÉS CINÉMATIQUES DU GROUPE LOCAL

A la fin du siècle dernier, l'astronome américain Gould signala la présence d'une anomalie dans la distribution des directions des étoiles les plus brillantes du ciel : ces étoiles ne sont pas groupées le long du cercle galactique, mais contenues dans une bande relativement large (environ 30°) dont la ligne centrale peut être assimilée à un grand cercle de la sphère céleste faisant avec le cercle galactique un angle voisin de vingt degrés. La majorité des étoiles brillantes est située au-dessus du plan galactique ($b'' > 0$) quand on regarde dans la direction du centre de la Galaxie, au-dessous ($b'' < 0$) quand on regarde dans la direction opposée. Ce phénomène, déjà remarqué par John Hershel vers 1850, a reçu le nom de Gould's belt. Les figures 18a et 18b empruntées à un mémoire de H. Shapley et A. J. Cannon (1924) permettent de comparer la distribution des directions des étoiles de type spectral B dont la magnitude apparente est inférieure à 5,25 à celle des étoiles dont la magnitude est comprise entre 7,25 et 8,25. Cette comparaison montre clairement l'existence de l'anomalie signalée par Gould.

Depuis le début du siècle, ce phénomène a fait l'objet de nombreuses études et, pour l'expliquer, on a émis très tôt l'hypothèse de l'existence d'un système local entourant le soleil et composé, non seulement des étoiles de type spectral O à B5, mais d'étoiles de type A et de certaines nébuleuses diffuses. Cependant des études ultérieures basées sur des dénombrements d'étoiles au voisinage du soleil ayant conduit à des résultats peu convaincants ou souvent même contradictoires, la réalité de ce système est maintenant contestée par un certain nombre d'auteurs qui pensent que l'anomalie observée est due, non à un système unique, mais à un certain nombre de petites concentrations isolées : il suffit d'éliminer celles-ci des dénombrements pour que le plan galactique redevienne plan de symétrie de la distribution des étoiles B.

En réalité, l'analyse des dénombrements d'étoiles portant sur des observations insuffisantes, en qualité et en quantité, compliquée encore par l'existence d'une absorption irrégulière au voisinage du soleil, ne permet pas de trancher cette question d'une façon certaine.

La question peut alors être abordée d'une autre façon. Si l'on écarte provisoirement l'hypothèse peu constructive d'une concentration d'étoiles uniquement due au hasard, il est alors légitime d'envisager la possibilité d'une origine commune pour les objets appartenant à celle-ci. Les propriétés cinématiques globales du système seraient alors celles d'un groupe en état de dissociation.

A. Blaauw (1952), en se basant sur la théorie des trajectoires variées de B. Lindblad, a développé une méthode permettant à la fois de reconnaître l'existence d'un mouvement d'expansion dans les associations stellaires et d'estimer l'âge de celles-ci. Cette méthode, et les modifications qu'il convient d'y apporter pour la rendre applicable au problème particulier qui nous intéresse, vont être brièvement exposées ci-après.

## MOUVEMENT DES ETOILES DANS LE PLAN GALACTIQUE

La théorie du mouvement des étoiles dans le champ de forces galactique a été développée par B. Lindblad dans une série d'articles parus dans les Annales de l'Observatoire de Stockholm depuis

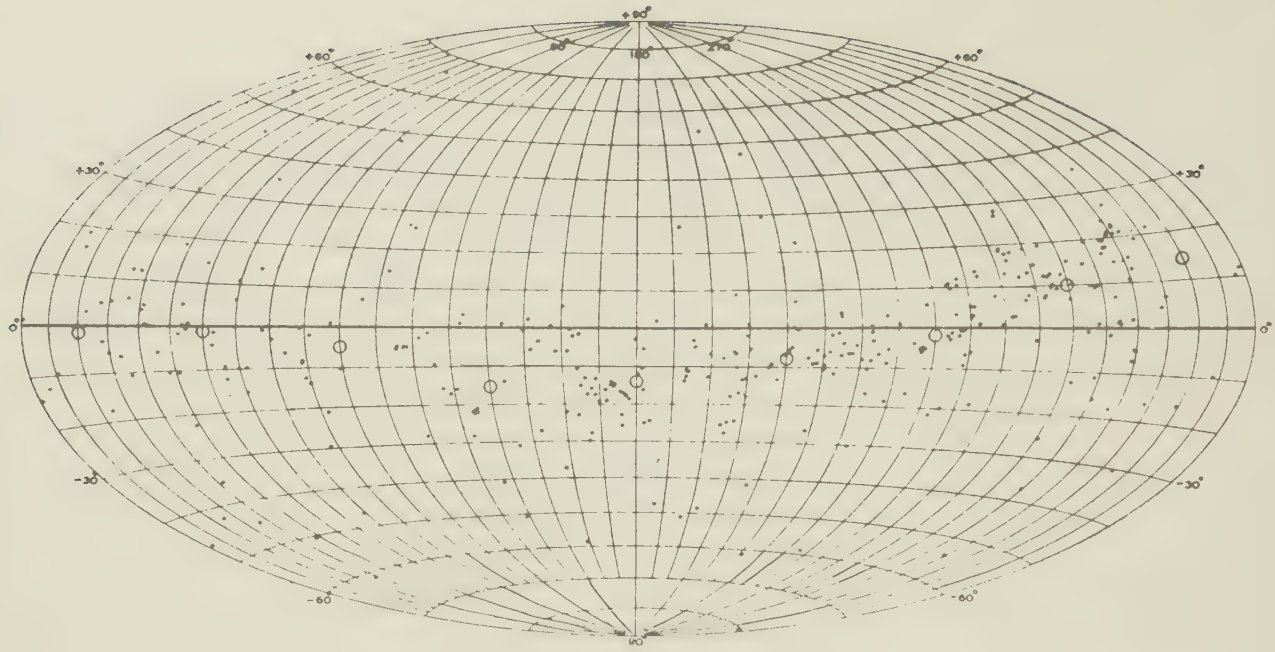


Fig. 18a - Distribution des directions des étoiles B ($m < 5,26$) en coordonnées galactiques $l'$ et b'.

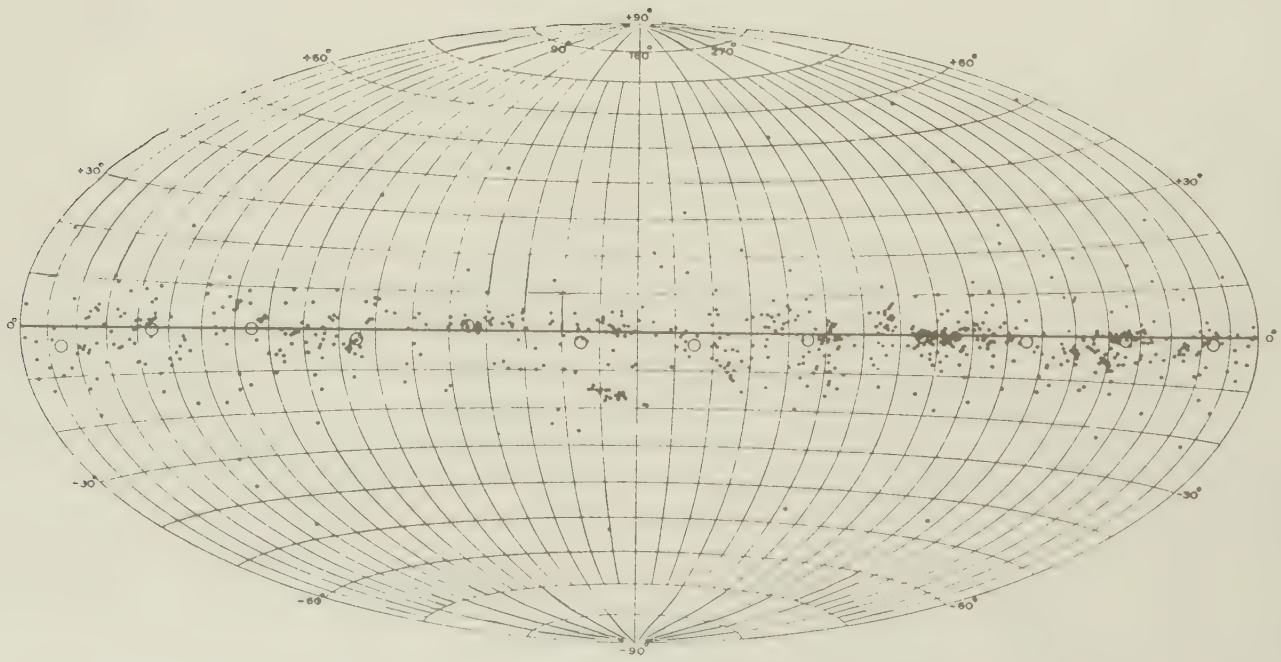


Fig. 18b - Distribution des directions des étoiles B ($7,25 < m < 8,25$) en coordonnées galactiques $l'$ et b'.

1941. Cette théorie ayant été exposée, d'une manière plus condensée, par son auteur dans le volume LIII du Handbuch der Physik au chapitre intitulé : "Galactic Dynamics" et dans divers traités d'Astronomie Stellaire et d'Astrophysique, nous nous bornerons à rappeler ici les résultats nécessaires au développement de la présente étude.

Soit, dans le plan galactique, un repère O $\xi$ $\eta$ dont l'origine O est animée d'un mouvement circulaire uniforme de vitesse angulaire $\omega$ autour du centre C de la Galaxie ; l'axe O $\xi$ étant à tout instant dirigé vers l'anticentre galactique et l'axe O$\eta$ dans le sens de la rotation (fig. 19).

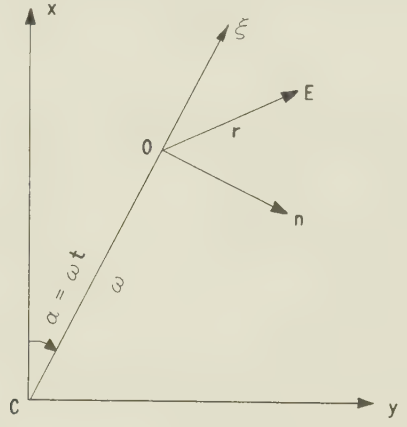


Fig. 19

Considérons une étoile E située dans le plan galactique. Tant que la distance r = OE de cette étoile à l'origine O du repère reste petite par rapport à $\varpi$ = CO ($r^2$ négligeable devant $\varpi^2$), il est possible d'exprimer les coordonnées $\xi$ et $\eta$ de cette étoile et les composantes $\dot{\xi}$ et $\dot{\eta}$ de sa vitesse par rapport au repère O $\xi$ $\eta$ en fonction du temps t et des constantes A et B de la rotation différentielle :

$$\xi = m \sin \chi t + n \cos \chi t + p \qquad (1)$$

$$\eta = \frac{2\omega}{\chi} m \cos \chi t - \frac{2\omega}{\chi} n \sin \chi t - 2Apt - \frac{2\omega}{\chi} m + \eta_o \qquad (2)$$

$$\dot{\xi} = m\chi \cos \chi t - n\chi \sin \chi t \qquad (3)$$

$$\dot{\eta} = -2\omega m \sin \chi t - 2\omega n \cos \chi t - 2Ap, \qquad (4)$$

avec

$$\omega = A - B \qquad \chi^2 = -4B(A - B) = -4B\omega$$

$$m = \frac{\dot{\xi}_o}{\chi} \qquad n = \xi_o - p \qquad p = \frac{2\omega}{\chi^2}(2\omega \xi_o + \dot{\eta}_o)$$

où $\xi_o$, $\eta_o$, $\dot{\xi}_o$ et $\dot{\eta}_o$ désignent respectivement les coordonnées de l'étoile et les composantes de sa vitesse à l'instant origine $t_o = 0$.

Les équations (1) et (2) montrent que l'étoile E décrit autour du centre C de la Galaxie une épicycloïde dont la période est $2\pi/\chi$.

## APPLICATION A L'EVOLUTION DES ASSOCIATIONS STELLAIRES -

Pour étudier le mouvement d'expansion des étoiles dans une association, A. Blaauw (1952) a admis qu'à l'époque de leur formation tous les membres de celle-ci étaient contenus dans un petit volume dont les dimensions initiales étaient négligeables par rapport aux dimensions actuelles de l'association et que la distribution des vitesses initiales des étoiles était isotrope.

Avec ces hypothèses, en désignant par $\varphi$ l'angle de position de la vitesse initiale d'une étoile avec l'axe $O\eta$, les conditions initiales et les équations de sa trajectoire se simplifient :

$$\xi_o = \eta_o = 0 \qquad \dot{\xi}_o = s_o \sin\varphi \qquad \dot{\eta}_o = s_o \cos\varphi$$

$$\xi = \frac{s_o}{\chi} \sin \chi t \sin\varphi + \frac{2\omega s_o}{\chi^2} (1 - \cos \chi t) \cos\varphi \tag{1'}$$

$$\eta = \frac{-2\omega s_o}{\chi^2} (1 - \cos \chi t) \sin\varphi + \frac{4\omega s_o}{\chi^2} \left(\frac{\omega}{\chi} \sin \chi t - At\right) \cos\varphi \tag{2'}$$

les composantes de sa vitesse étant :

$$\dot{\xi} = s_o \cos \chi t \sin\varphi + \frac{2\omega s_o}{\chi} \sin \chi t \cos\varphi \tag{3'}$$

$$\dot{\eta} = -\frac{2\omega s_o}{\chi} \sin \chi t \sin\varphi + \frac{4\omega s_o}{\chi^2} (\omega \cos \chi t - A) \cos\varphi \tag{4'}$$

Ces composantes peuvent alors s'exprimer simplement en fonction des coordonnées de l'étoile et du temps.

$$\dot{\xi} = s_o \sin\varphi + 2At s_o \cos\varphi - 2B\eta \tag{3''}$$

$$\dot{\eta} = s_o \cos\varphi - 2\omega\xi \tag{4''}$$

Les équations 1' et 2' montrent que les étoiles qui, à l'instant initial $t_o = 0$, sont contenues dans un petit volume coïncidant avec l'origine O du repère, se placent sur une ellipse dont les dimensions dépendent uniquement de la vitesse initiale $s_o$ et de l'intervalle de temps t qui s'est écoulé depuis le début de l'expansion, (fig. 20). La comparaison de la distribution spatiale des membres de l'association avec le modèle calculé permet alors d'évaluer l'âge de celle-ci.

En particulier, l'angle X de la direction du grand axe de l'ellipse calculée peut s'exprimer en fonction du temps seul :

$$\operatorname{tg} 2X = \frac{\cos \chi t - 1}{At - \frac{A - 2B}{\chi} \sin \chi t}$$

et fournit, par comparaison avec la direction de la plus grande dimension du nuage d'étoiles du groupe réel, une estimation directe de l'âge. En adoptant pour les constantes A et B de la rotation différentielle les valeurs :

$$A = +0,020 \text{ km sec}^{-1} \text{ pc}^{-1}$$
$$B = -0,007 \text{ km sec}^{-1} \text{ pc}^{-1},$$

l'application de cette méthode a permis à A. Blaauw d'estimer à $72 \times 10^6$ ans l'âge de l'association du Scorpion-Centaure.

Il faut remarquer cependant que cette méthode n'est applicable qu'à des groupes dont tous les membres ont été correctement identifiés à l'aide de critères portant à la fois sur leur vitesse et sur leur répartition dans l'espace et dont, par conséquent, les limites sont bien déterminées. Cela n'est possible, en général, que pour des groupes dont les membres occupent une portion relativement petite de la sphère céleste. Pour un groupe de plus grandes dimensions et couvrant la presque totalité de la sphère céleste, l'identification de ses membres est très incertaine. On peut craindre, de plus, qu'un effet de sélection observationnelle (observations plus ou moins nombreuses dans certaines directions) ne fausse notablement la répartition spatiale des membres de celui-ci. Cette dernière remarque s'applique particulièrement au groupe que nous nous proposons d'étudier, par suite de l'accumulation d'observations spectrophotométriques récentes dans la région du Scorpion-Centaure.

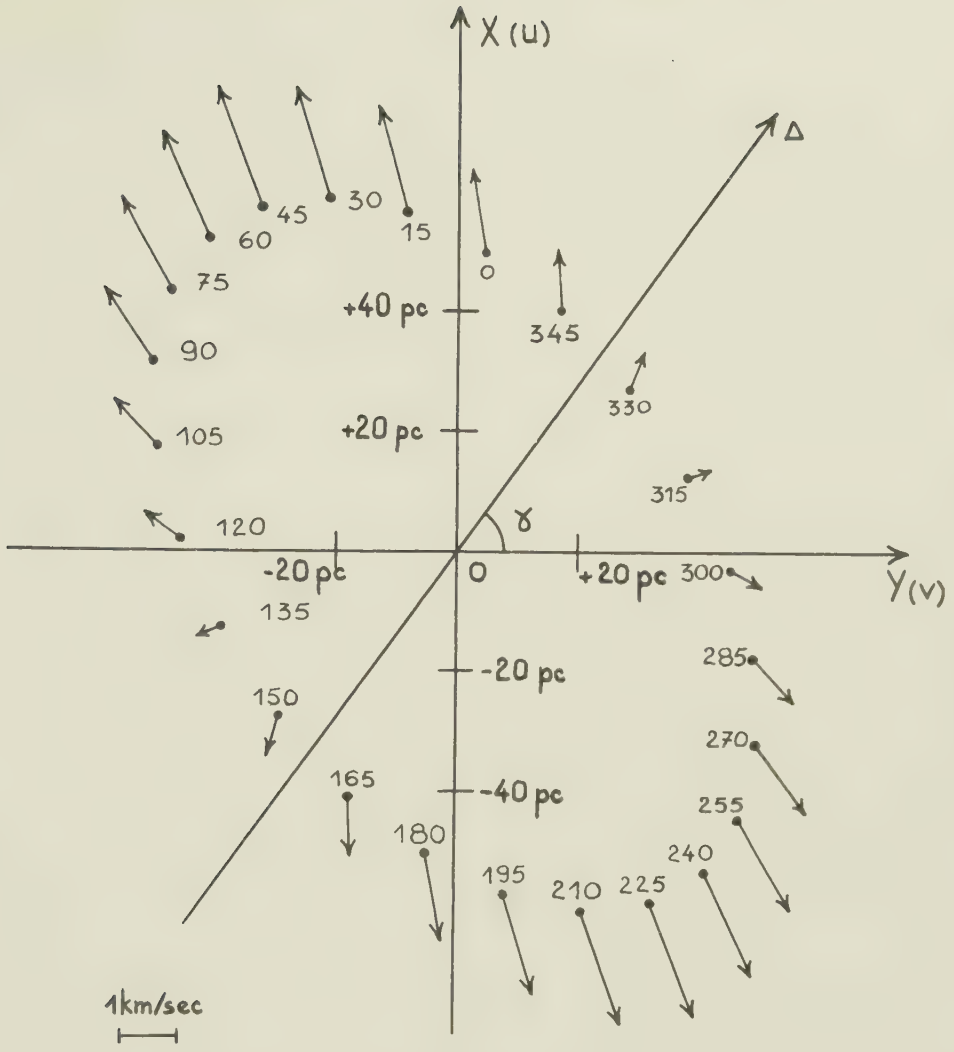


Fig. 20 - Répartition dans le plan galactique des membres d'un groupe en expansion, ($t = 48,6 \times 10^6$ ans).

Il semble cependant possible de reconnaître l'existence d'un mouvement d'expansion dans un groupe dont les frontières sont mal déterminées en ne se basant plus sur sa forme, mais en comparant les propriétés de la distribution des vitesses spatiales observées à celles de la distribution des vitesses calculées d'après la méthode exposée au paragraphe ci-après.

## PROPRIETE CARACTERISTIQUE DE LA DISTRIBUTION DES VITESSES DES MEMBRES D'UN GROUPE EN EXPANSION

Nous admettrons, comme l'a fait A. Blaauw, qu'au début de l'expansion les étoiles étaient contenues dans un petit volume de dimensions négligeables et que la distribution des vitesses initiales était isotrope. Les composantes de la vitesse d'un membre par rapport au repère O $\xi$ $\eta$ sont alors données par les relations (3') et (4'), mais la comparaison des vitesses observées et calculées n'est possible qu'après avoir exprimé celles-ci dans un même système de référence. Or, s'ils sont correctement dépouillés des erreurs systématiques des catalogues et de l'influence de la rotation différentielle de la galaxie sur la définition des repères fondamentaux (corrections de H. R. Morgan et J. H. Oort) (1951), les mouvements propres sont rapportés à des axes qui gardent une direction fixe au cours du temps. Le système d'axe OXYZ dans lequel on exprime habituellement les positions et les vitesses observées et dont les axes ont, à l'instant considéré, les directions suivantes :

OX dirigé vers l'anticentre ($l'' = 180°$, $b'' = 0$)

OY dirigé dans le sens de la rotation ($l'' = 90°$, $b'' = 0$)

OZ dirigé vers le pôle galactique nord ($b'' = 90°$),

ne coïncide donc avec le système O $\xi$ $\eta$ $\zeta$ (O$\zeta$ dirigé vers le pôle nord galactique) qu'à l'instant considéré.

Par rapport à $\xi$ O $\eta$ le repère XOY est donc animé d'un mouvement de rotation de vitesse angulaire $\omega$ s'effectuant dans le sens opposé à la rotation galactique, (fig. 21).

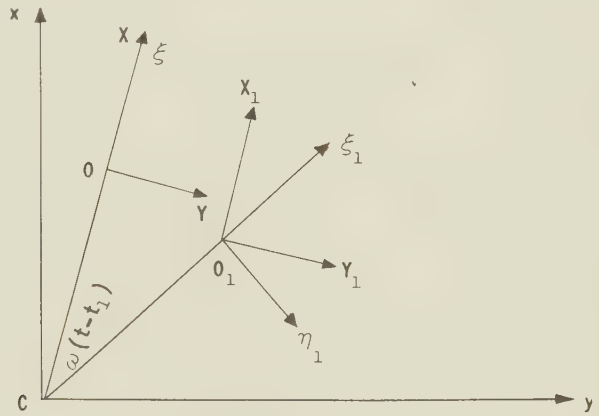


Fig. 21 - Positions relatives des systèmes XOY et $\xi$ O $\eta$ à 2 époques t et $t_1$.

En désignant par X et Y les coordonnées de l'étoile et par U et V les composantes de sa vitesse dans les axes XOY il vient :

$$X = \xi \qquad Y = \eta \tag{5}$$

et

$$U = \dot{\xi} - \omega\eta = s_o \sin\varphi + 2Ats_o \cos\varphi - (A + B)\, Y \tag{6}$$

$$V = \dot{\eta} + \omega\xi = s_o \cos\varphi - \omega X \tag{6}$$

que l'on peut écrire sous la forme :

$$X = a \sin\varphi + b \cos\varphi$$
$$Y = c \sin\varphi + d \cos\varphi$$

$$U = a' \sin\varphi + b' \cos\varphi$$
$$V = c' \sin\varphi + d' \cos\varphi$$

en posant :

$$a = \frac{\sin \chi t}{\chi} s_o \qquad b = \frac{2\omega}{\chi^2}(1 - \cos \chi t)\, s_o$$

$$c = -b \qquad d = \frac{4\omega}{\chi^2}\left(\frac{\omega}{\chi} \sin \chi t - At\right) s_o$$

$$a' = s_o + (A + B)\, b \qquad b' = 2Ats_o - (A + B)\, d = \omega(2a - d)$$

$$c' = -\omega a \qquad d' = s_o - \omega b$$

La figure 20 montre la configuration d'un groupe d'étoiles en expansion à une époque t choisie arbitrairement et correspondant à $48,6 \times 10^6$ ans ($\chi t = 90°$) après sa formation. Les calculs ont été

effectués en adoptant, pour les constantes de la rotation différentielle, les valeurs récemment recommandées par l'Union Astronomique Internationale (1961).

$$A = + 0,015 \text{ km.sec}^{-1}.\text{pc}^{-1} = + 1,535 \times 10^{-8} \text{ an}^{-1}$$
$$B = - 0,010 \text{ km.sec}^{-1}.\text{pc}^{-1} = - 1,023 \times 10^{-8} \text{ an}^{-1},$$

pour le module de la vitesse initiale la valeur :

$$s_o = 1 \text{ km.sec}^{-1},$$

et pour $\varphi$ des valeurs croissant en progression arithmétique de raison 15°.

Les flèches indiquent la direction et la grandeur de la vitesse de chaque membre par rapport aux axes OXY.

TAUX D'EXPANSION D'UN GROUPE D'ETOILES DANS UNE DIRECTION $\Delta$ DONNEE -

Soit une direction $\Delta$ du plan galactique passant par le centre O du groupe et définie par son angle de position $\gamma$ avec l'axe OY. La projection v de la vitesse d'un membre E du groupe sur $\Delta$ est :

$$v = U \sin\gamma + V \cos\gamma = (a' \sin\gamma + c' \cos\gamma) \sin\varphi + (b' \sin\gamma + d' \cos\gamma) \cos\varphi \qquad (7)$$

De même, la projection $\rho$ de la distance OE de ce membre sur $\Delta$ s'écrit :

$$\rho = X \sin\gamma + V \cos\gamma = (a \sin\gamma + c \cos\gamma) \sin\varphi + (b \sin\gamma + d \cos\gamma) \cos\varphi \qquad (8)$$

Les équations (7) et (8) montrent que, dans le plan ($\rho$, v), les points représentatifs des étoiles se placent sur des ellipses homothétiques, centrées à l'origine des coordonnées et dont les dimensions sont proportionnelles à la vitesse $s_o$ (fig. 22).

La variation moyenne de la projection v de la vitesse en fonction de $\rho$ peut alors être estimée par une relation de la forme :

$$v = k\rho \qquad (9)$$

où k désigne le taux d'expansion dans la direction $\Delta$.

Dans le cas du modèle considéré cette quantité est égale à la pente de la direction du grand axe des ellipses par rapport à l'axe $\rho$ et nous avons, k étant toujours très petit :

$$k = \text{tg}\,\varepsilon \# \frac{1}{2} \text{tg}\,2\varepsilon =$$

$$\frac{(a' \sin\gamma + c' \cos\gamma)(a \sin\gamma + c \cos\gamma) + (b' \sin\gamma + d' \cos\gamma)(b \sin\gamma + d \cos\gamma)}{(a \sin\gamma + c \cos\gamma)^2 + (b \sin\gamma + d \cos\gamma)^2 - (a' \sin\gamma + c' \cos\gamma)^2 - (b' \sin\gamma + d' \cos\gamma)^2} \qquad (10)$$

$\varepsilon$ désignant l'angle du grand axe des ellipses avec l'axe $\rho$.

Le taux d'expansion k a été calculé pour différentes valeurs de l'angle de position $\gamma$ de la direction $\Delta$ ($\gamma$ variant de 15° en 15°) et pour 2 valeurs différentes de l'âge du groupe (48,6 et 56,6 millions d'années). La figure 22 représente la configuration des points de coordonnées $\rho$ et v pour quelques unes des valeurs de $\gamma$ considérées. Elle a été construite en adoptant les mêmes conditions que pour la figure 20 : $t = 48,6 \times 10^6$ ans ; $s_o = 1$ km.sec$^{-1}$ et $\varphi$ variant de 15 en 15°.

L'aspect de la variation du taux d'expansion k en fonction de $\gamma$ est représenté sur le diagramme de la figure 23 pour les deux valeurs adoptées de l'âge du groupe : courbe a : t = 48,6 millions d'années ; courbe b : t = 56,6 millions d'années. On peut s'assurer qu'il caractérise bien un groupe en expansion en le comparant à l'aspect de la variation du taux d'expansion d'un groupe "normal",

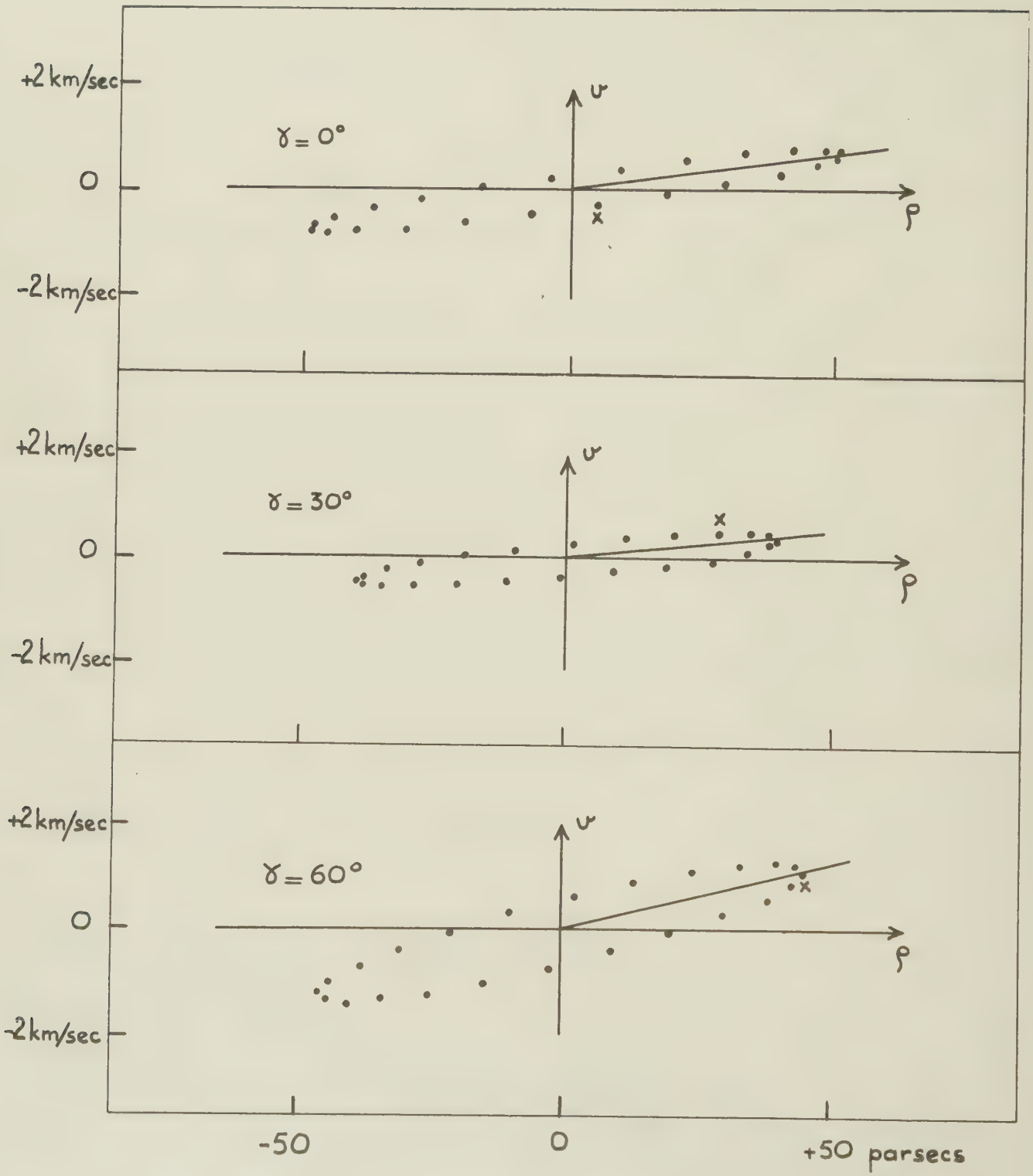


Fig. 22 - Variation du taux d'expansion k avec la direction Δ ($t = 48,6 \times 10^6$ ans).

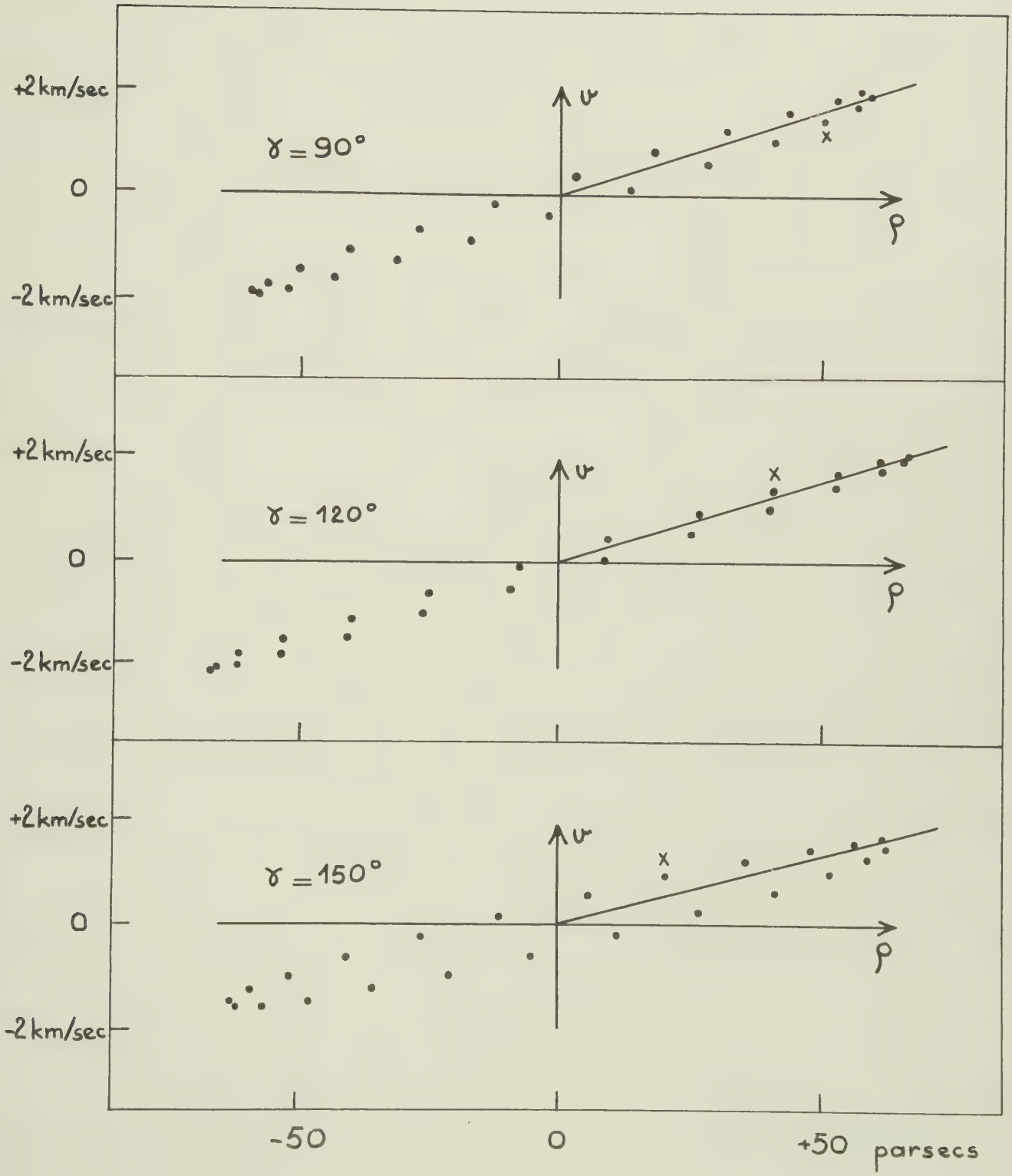
+2 km/sec
0
-2 km/sec
γ = 90°
v
ρ
+2 km/sec
0
-2 km/sec
γ = 120°
v
ρ
+2 km/sec
0
-2 km/sec
γ = 150°
v
ρ
-50
0
+50 parsecs

Fig. 22 - (Suite).

c'est-à-dire, d'un groupe qui est seulement étiré par la rotation galactique différentielle, en l'absence de tout autre effet systématique (étoiles de champ).

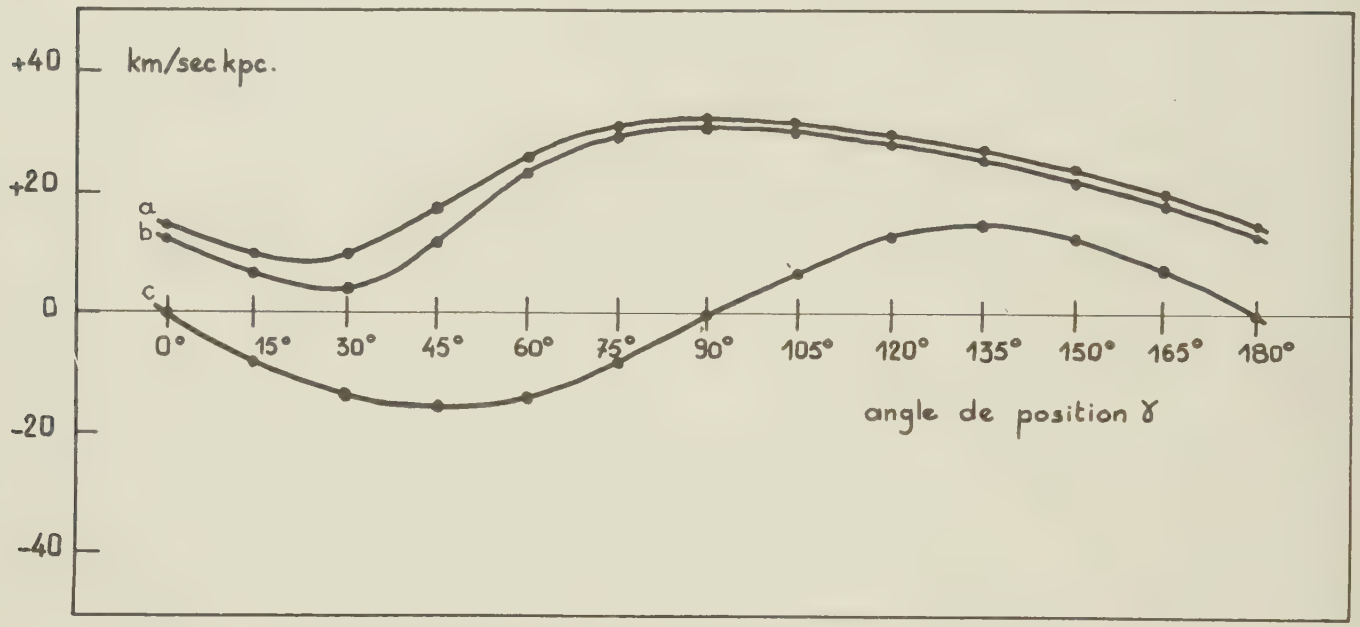


Fig. 23 - Variation du taux d'expansion k avec l'angle de position $\gamma$ de la direction $\Delta$. Courbe a : $t = 48,6 \times 10^6$ ans ; courbe b : $t = 56,6 \times 10^6$ ans ; courbe c : étoiles de champ.

En effet, soient X° et Y° les coordonnées d'un membre d'un tel groupe et U°, V° les composantes de sa vitesse par rapport aux axes OXY. En désignant par $l''$ la longitude de ce membre et par r sa distance à l'origine O nous avons :

$$X° = - r \cos l'' \qquad Y° = r \sin l'',$$

l'effet dû à la rotation différentielle se traduisant par :

$$U° = - \omega Y° = - \omega r \sin l''$$
$$V° = - (A + B) X° = (A + B) r \cos l''$$

Un calcul analogue au précédent montre alors que le taux d'expansion k° dans une direction $\Delta$ donnée est :

$$k° \simeq \frac{1}{2} \operatorname{tg} 2\varepsilon° \simeq - A \sin 2\gamma$$

La courbe c de la figure 23 représente la variation de k° en fonction de $\gamma$ ; son aspect est très différent de celui des deux autres courbes.

Il semble donc possible de reconnaître l'existence d'un mouvement réel d'expansion dans un groupe d'étoiles en comparant les variations de l'estimation réelle du taux d'expansion de ce groupe en fonction de l'angle $\gamma$ aux variations théoriques indiquées par les courbes de la figure 23.

ESTIMATION DE L'AGE DU GROUPE -

En principe, cette méthode permet aussi une évaluation de l'âge du groupe. Dans ce but, la valeur minimale du taux k dont la position est théoriquement bien déterminée et dont la valeur est plus sensible à l'âge que ne l'est celle du maximum, semble le critère le plus indiqué. Cependant, pour un groupe réel dont les membres n'ont pas tous été identifiés avec certitude, faute de critères appropriés, on peut craindre qu'un nombre relativement important d'étoiles n'appartenant pas au groupe considéré n'ait été retenu dans la sélection. L'influence d'un tel "mélange" est difficilement appréciable, mais l'on conçoit aisément qu'il puisse perturber d'une façon non négligeable l'allure générale de la variation de k et, plus particulièrement, l'estimation réelle de sa valeur minimale.

On peut chercher à minimiser l'influence de ce mélange en adoptant comme indicateur d'âge le rapport :

$$\mathcal{R} = k_x / k_y$$

des taux d'expansion $k_y$ et $k_x$ dans les directions définies par $\gamma = 0$ (axe OY) et $\gamma = 90°$ (axe OX), ces quantités présentant l'avantage d'être rapidement estimables quand on connaît la vitesse et la position des membres supposés du groupe réel.

Les variations de ces trois quantités en fonction de l'âge du groupe sont indiquées sur le diagramme de la figure 24.

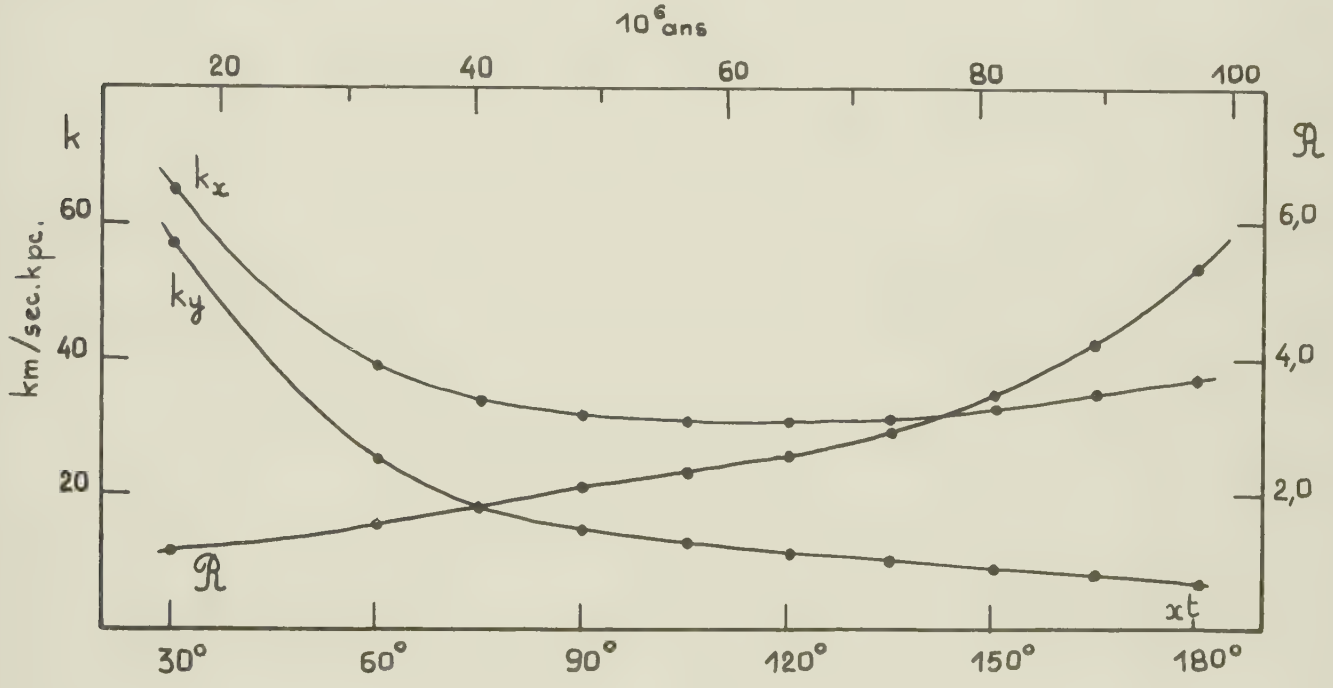


Fig. 24 - Variation des taux d'expansion $k_y$ et $k_x$ dans les directions OY et OX et de leur rapport $\mathcal{R}$ en fonction de l'âge du groupe.

Le taux d'expansion $k_x$ dont la variation est pratiquement nulle pour des âges allant de 40 à 80 millions d'années est à éliminer comme indicateur d'âge. En l'absence de tout mélange, le taux $k_y$ et le rapport $\mathcal{R}$ qui ont dans le même intervalle des variations de même ordre de grandeur (mais de signe contraire) peuvent être utilisés indifféremment ou, mieux encore, simultanément. Pour un groupe réel, pour lequel la possibilité d'un certain mélange n'est pas exclue, la comparaison des âges évalués à l'aide de ces deux quantités peut alors permettre d'apprécier qualitativement l'homogénéité du matériel sélectionné.

VITESSE DU GROUPE PAR RAPPORT AU SOLEIL -

Jusqu'à présent, dans le but de simplifier l'exposé, nous avons admis plus ou moins implicitement que le nuage qui a donné naissance aux étoiles du groupe était au repos par rapport au référentiel $O\,\xi\,\eta$ et que les axes désignés précédemment par OXY et par rapport auxquels on exprime les positions et les vitesses observées coïncidaient, à l'instant considéré, avec les axes $O\,\xi\,\eta$. Cela revient à admettre que les positions actuelles du soleil et du centre du groupe coïncident avec l'origine O de ces repères.

De telles simplifications, légitimes quand il s'agit de reconnaître les effets d'un mouvement d'expansion sur la distribution des vitesses individuelles, ne peuvent être maintenues quand on se propose de déterminer la vitesse du groupe par rapport au soleil.

a) Influence d'une éventuelle vitesse initiale du groupe par rapport au mouvement circulaire sur la distribution des positions et des vitesses des membres.

Soit toujours $O\,\xi\,\eta$ le référentiel dont l'origine, animée du mouvement circulaire de vitesse angulaire $\omega$, coïncide au début de l'expansion, avec le centre du nuage et soient :

$$\dot{\xi}_{oc} = S \sin \Phi \qquad \text{et} \qquad \dot{\eta}_{oc} = S \cos \Phi$$

les composantes de la vitesse initiale du nuage sur ces axes.

La distribution des vitesses d'éjection des membres sera encore supposée isotrope, non plus par rapport au repère $O\,\xi\,\eta$ lui-même, mais par rapport à un système de référence lié au nuage. Dans ces conditions les composantes des vitesses initiales seront :

$$\dot{\xi}_{om} = s_o \sin \varphi + S \sin \Phi \tag{11}$$

$$\dot{\eta}_{om} = s_o \cos \varphi + S \cos \Phi \tag{11}$$

D'après les équations (1'), (2'), (3') et (4'), les coordonnées $\xi_m$ et $\eta_m$ et les composantes de la vitesse $\dot{\xi}_m$ et $\dot{\eta}_m$ s'écriront :

$$\xi_m = \xi + \xi_c = \xi + \frac{S}{\chi} \sin \chi t \sin \Phi + \frac{2\omega}{\chi^2} S (1 - \cos \chi t) \cos \Phi \tag{12}$$

$$\eta_m = \eta + \eta_c = \eta - \frac{2\omega}{\chi^2} S (1 - \cos \chi t) \sin \Phi + \frac{4\omega}{\chi^2} S \left( \frac{\omega}{\chi} \sin \chi t - At \right) \cos \Phi \tag{12}$$

$$\dot{\xi}_m = \dot{\xi} + \dot{\xi}_c = \dot{\xi} + S \cos \chi t \sin \Phi + \frac{2\omega}{\chi} S \sin \chi t \cos \Phi \tag{13}$$

$$\dot{\eta}_m = \dot{\eta} + \dot{\eta}_c = \dot{\eta} - \frac{2\omega}{\chi} S \sin \chi t \sin \Phi + \frac{4\omega}{\chi^2} S (\omega \cos \chi t - A) \cos \Phi, \tag{13}$$

relations dans lesquelles $\xi$, $\eta$, $\dot{\xi}$ et $\dot{\eta}$ désignent les coordonnées et les composantes de la vitesse d'une étoile à l'instant t dans le cas où le centre du groupe est supposé au repos par rapport à $O\,\xi\,\eta$, (relations 1', 2', 3' et 4') et, $\xi_c$, $\eta_c$, $\dot{\xi}_c$, $\dot{\eta}_c$ les coordonnées et les composantes de la vitesse du centre du groupe.

Ces équations montrent que la prise en considération d'une vitesse initiale du nuage ne modifie pas la disposition relative des membres du groupe qui, à un instant donné, sont toujours disposés sur des ellipses dont les dimensions ne dépendent que de la vitesse initiale d'éjection $s_o$. En revanche, les vitesses individuelles doivent être corrigées d'un vecteur dont les composantes $\dot{\xi}_c$ et $\dot{\eta}_c$ ne dépendent que de la vitesse initiale du nuage.

b) Calcul des positions et des vitesses des membres dans un système de référence lié au soleil.

Soit O'X'Y' un repère dont l'origine est animée d'un mouvement circulaire uniforme autour du centre C de la galaxie et coïncide avec la position actuelle du soleil, les axes de ce système gardant une direction fixe dans l'espace. Pour pouvoir être directement comparées aux valeurs observées, les vitesses et les positions des membres du groupe théorique doivent être rapportées à ce système ; les vitesses étant, de plus, corrigées de la vitesse du soleil par rapport à celui-ci.

Pour la commodité des calculs, nous introduirons un repère intermédiaire : le référentiel O' $\xi'$ $\eta'$ dont les axes coïncident avec les axes de O'X'Y' à l'instant considéré, mais dont l'axe O$\xi'$ est à tout instant dirigé vers l'anticentre galactique (fig. 25). Les coordonnées et les vitesses seront d'abord rapportées à O' $\xi'$ $\eta'$ puis à O'X'Y'.

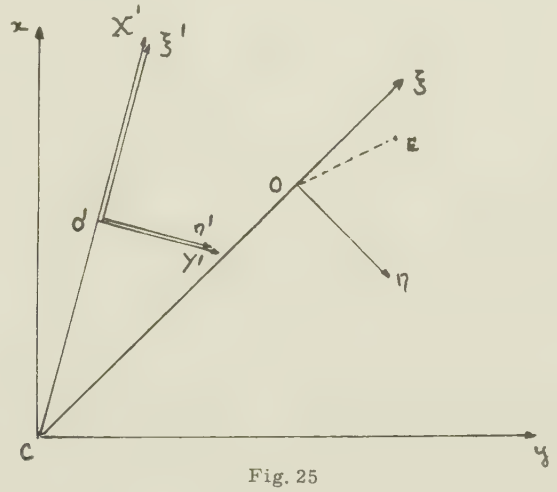


Fig. 25

Soient donc $\xi'_o$ (= $X'_o$) et $\eta'_o$ (= $Y'_o$), les coordonnées de l'origine O dans les axes O' $\xi'$ $\eta'$ (ou O'X'Y'). En se plaçant dans le cas où la distance OO' est très petite vis-à-vis de la distance de O par rapport au centre de la galaxie, il est légitime de négliger l'angle des repères et l'on peut écrire les relations bien connues :

$$\xi' = \xi_m + \xi'_o$$
$$\eta' = \eta_m + \eta'_o$$

et

$$\dot{\xi}' = \dot{\xi}_m \qquad \dot{\eta}' = \dot{\eta}_m - 2A\,\xi'_o$$

Les coordonnées $\mathfrak{x}$ et $\mathfrak{y}$ et les composantes U' et V' de la vitesse dans le repère O'X'Y' en rotation de vitesse angulaire $\omega$ par rapport au référentiel local O' $\xi'$ $\eta'$ sont données par :

$$\mathfrak{x} = \xi' = \xi_m + \xi'_o = \xi + \xi_c + X'_o \tag{14}$$
$$\mathfrak{y} = \eta' = \eta_m + \eta'_o = \eta + \eta_c + Y'_o \tag{14}$$
$$U' = \dot{\xi}' - \omega\,\eta' = \dot{\xi} - \omega\,\eta + \dot{\xi}_c - \omega\,\eta_c - \omega\,Y'_o \tag{15}$$
$$V' = \dot{\eta}' + \omega\,\xi' = \dot{\eta} + \omega\,\xi + \dot{\eta}_c + \omega\,\xi_c - (A + B)\,X'_o \tag{15}$$

Soient maintenant $U'_o$ et $V'_o$ les composantes de la vitesse du soleil par rapport aux axes O'X'Y' (ou au référentiel local O' $\xi'$ $\eta'$). Les coordonnées et les composantes $\mathfrak{u}$ et $\mathfrak{v}$ de la vitesse d'un membre par rapport au soleil sont :

$$\mathfrak{x} = \xi + \xi_c + X'_o \tag{16}$$
$$\mathfrak{y} = \eta + \eta_c + Y'_o \tag{16}$$

$$\mathcal{U} = U' - U'_o = \dot{\xi} - \omega\,\eta + \dot{\xi}_c - \omega\,\eta_c - \omega\,Y'_o - U'_o \qquad (17)$$

$$\mathcal{V} = V' - V'_o = \dot{\eta} + \omega\,\xi + \dot{\eta}_c + \omega\,\xi_c - (A+B)\,X'_o - V'_o \qquad (17)$$

Les coordonnées $\mathcal{X}_c$, $\mathcal{Y}_c$ et les composantes $\mathcal{U}_c$ et $\mathcal{V}_c$ de la vitesse héliocentrique du centre du groupe sont obtenues en annulant les quantités $\xi$, $\eta$, $\dot{\xi}$ et $\dot{\eta}$ dans les équations précédentes, il vient :

$$\mathcal{X}_c = \xi_c + X'_o \qquad (18)$$

$$\mathcal{Y}_c = \eta_c + Y'_o \qquad (18)$$

$$\mathcal{U}_c = \dot{\xi}_c - \omega\,\eta_c - \omega\,Y'_o - U'_o = \dot{\xi}_c - \omega\,\mathcal{Y}_c - U'_o \qquad (19)$$

$$\mathcal{V}_c = \dot{\eta}_c + \omega\,\xi_c - (A+B)\,X'_o - V'_o = \dot{\eta}_c + 2A\,\xi_c - (A+B)\,\mathcal{X}_c - V'_o \qquad (19)$$

Finalement les équations (16) et (17) s'écriront :

$$\mathcal{X} = X + \mathcal{X}_c, \quad \mathcal{Y} = Y + \mathcal{Y}_c \qquad (20)$$

$$\mathcal{U} = U + \mathcal{U}_c, \quad \mathcal{V} = V + \mathcal{V}_c, \qquad (21)$$

dans lesquelles X, Y, U et V sont reliés aux données initiales et à l'âge du groupe par les relations (3, 4, 5 et 6) et $\mathcal{X}_c$ $\mathcal{Y}_c$ $\mathcal{U}_c$ et $\mathcal{V}_c$ successivement définis par les relations (12, 13, 14 et 15).

Les relations (20) montrent que la disposition relative des membres du groupe est inchangée, ce qui était évident a priori. Les relations (21) sont plus intéressantes : elles montrent que la vitesse par rapport au soleil d'un membre du groupe est la somme de deux vitesses. La première, dont les composantes sont U et V, est appelée vitesse particulière ; elle peut être évaluée dans le cas simple où l'on suppose le centre du nuage et le soleil au repos en O (origine du repère O $\xi$ $\eta$). La seconde, dont les composantes $\mathcal{U}_c$ et $\mathcal{V}_c$ sont déterminées par les équations (19), représente la vitesse du centre du groupe par rapport au soleil et est appelée vitesse d'ensemble du groupe, si l'on considère celui-ci comme un "courant d'étoiles".

c) Position du centre du groupe au début de l'expansion.

Dans le cas où tous les membres du groupe ont été identifiés, la position de son centre et sa vitesse d'ensemble par rapport au soleil peuvent être déterminées avec précision. Si, d'autre part, on suppose connue la vitesse du soleil par rapport au référentiel local, il est possible, d'après les équations (19), d'exprimer les quantités $\dot{\xi}_c$, $\dot{\eta}_c$ et $\xi_c$ en fonction de quantités connues :

$$\dot{\xi}_c = \mathcal{U}_c + \omega\,\mathcal{Y}_c + U'_o$$

$$\dot{\eta}_c + 2A\,\xi_c = \mathcal{V}_c + (A+B)\,\mathcal{X}_c + V'_o$$

L'âge du groupe ayant été estimé, les équations (12) et (13) permettent de calculer les composantes S sin $\Phi$ et S cos $\Phi$ de la vitesse initiale du centre du nuage et les composantes $\dot{\xi}_c$ et $\dot{\eta}_c$ de sa vitesse actuelle. Les équations (18) déterminent enfin les coordonnées héliocentriques $X'_o$ et $Y'_o$ de l'origine du référentiel O $\xi$ $\eta$ et la position de celle-ci au début de l'expansion, en tenant compte de la différence des vitesses de rotation des origines O et O'.

Nous n'insisterons pas sur cet aspect de la question qui a déjà été traité par A. Blaauw, d'une manière un peu différente il est vrai, et qui ne peut être appliqué au problème qui nous intéresse ici.

d) Détermination simultanée de la vitesse du groupe et du taux d'expansion.

Les projections $\rho'$ et v' de la position et de la vitesse sur une direction $\Delta$ faisant un angle $\gamma$ avec l'axe OY' s'écrivent alors :

$$\rho' = \mathcal{X} \sin\gamma + \mathcal{Y} \cos\gamma = (X \sin\gamma + Y \cos\gamma) + (\mathcal{X}_c \sin\gamma + \mathcal{Y}_c \cos\gamma) \qquad (22)$$

$$v' = \mathcal{U} \sin\gamma + \mathcal{V} \cos\gamma = (U \sin\gamma + V \cos\gamma) + (\mathcal{U}_c \sin\gamma + \mathcal{V}_c \cos\gamma) \qquad (23)$$

et, tenant compte de (7) et (8) et posant :

$$\rho_c = \mathfrak{x}_c \sin\gamma + \mathfrak{y}_c \cos\gamma \tag{24}$$

$$v_c = \mathfrak{u}_c \sin\gamma + \mathfrak{v}_c \cos\gamma, \tag{25}$$

il vient :

$$\rho' = \rho + \rho_c$$

$$v' = v + v_c$$

L'équation (9) :

$$v = k\rho$$

permettant d'estimer le taux d'expansion du groupe dans la direction $\Delta$ s'écrit alors :

$$v' = (v_c - k\rho_c) + k\rho'$$

ou posant :

$$v_c' = v_c - k\rho_c \tag{26}$$

$$v' = v_c' + k\rho' \tag{27}$$

L'estimation du taux d'expansion k nécessite donc celle d'une autre quantité $v_c'$ qui n'est susceptible d'une interprétation géométrique (et physique) simple que dans le cas où la distance du soleil au centre du groupe est petite. Le terme $k\rho_c$ est alors négligeable et $v_c'$ se réduit à $v_c$ qui représente la projection sur la direction $\Delta$ de la vitesse du groupe par rapport au soleil. Dans le plan $(\mathfrak{u}, \mathfrak{v})$, le lieu de l'extrémité de cette projection est un cercle C passant par l'origine O' du système de coordonnées et qui a pour diamètre le vecteur $\vec{S}_c$ représentant la vitesse du groupe par rapport au soleil.

Dans le cas où la distance du centre du groupe au soleil est telle que le terme $k\rho_c$, sans être négligeable, reste petit par rapport à $v_c$, le lieu de l'extrémité du segment d'origine O et de longueur $v_c'$ porté par $\Delta$ est une courbe C' dont la forme exacte est compliquée mais qui s'écarte peu d'un cercle. La figure 26 a été construite dans le cas où le centre du groupe est sur l'axe O$\mathfrak{x}$ à 100 parsecs du soleil, dans la direction du centre de la Galaxie ($\mathfrak{x}_c$ = - 100 pc, $\mathfrak{y}_c$ = 0). L'âge du groupe est de $48,6 \times 10^6$ ans et la vitesse du centre du groupe par rapport au soleil est représentée par le vecteur de composantes $\mathfrak{u}_c$ = 10 km. $s^{-1}$, $\mathfrak{v}_c$ = - 15 km. $s^{-1}$. On voit que la valeur du terme $v_c' = v_c - k\rho_c$ calculée pour $\gamma = 90°$ (axe O$\mathfrak{x}$) diffère de 3 km. $s^{-1}$ environ de la composante $\mathfrak{u}_c$.

Dans le cas où la répartition des vitesses initiales des membres du groupe est rigoureusement isotrope, le centre d'expansion (c'est-à-dire, la position actuelle du centre du nuage initial) coïncide exactement avec le centre des moyennes distances de l'ensemble des membres du groupe. Les composantes $\mathfrak{u}_c$ et $\mathfrak{v}_c$ de la vitesse du groupe par rapport au soleil sont alors les moyennes des composantes $\mathfrak{u}$ et $\mathfrak{v}$ des vitesses individuelles des membres.

Pour un groupe réel, la distribution des vitesses initiales n'est pas obligatoirement isotrope et, de plus, il est impossible d'affirmer que tous les membres de celui-ci ont été reconnus. Dans ces conditions, compte tenu des accumulations artificielles dues aux observations, la position du centre des moyennes distances peut être assez différente de celle du centre d'expansion.

L'estimation de la vitesse d'ensemble, par rapport au soleil, d'un groupe en expansion dans le champ de forces galactique pose donc un problème délicat, sinon insoluble, sur lequel nous reviendrons brièvement lors de l'estimation réelle du taux d'expansion du Groupe Local.

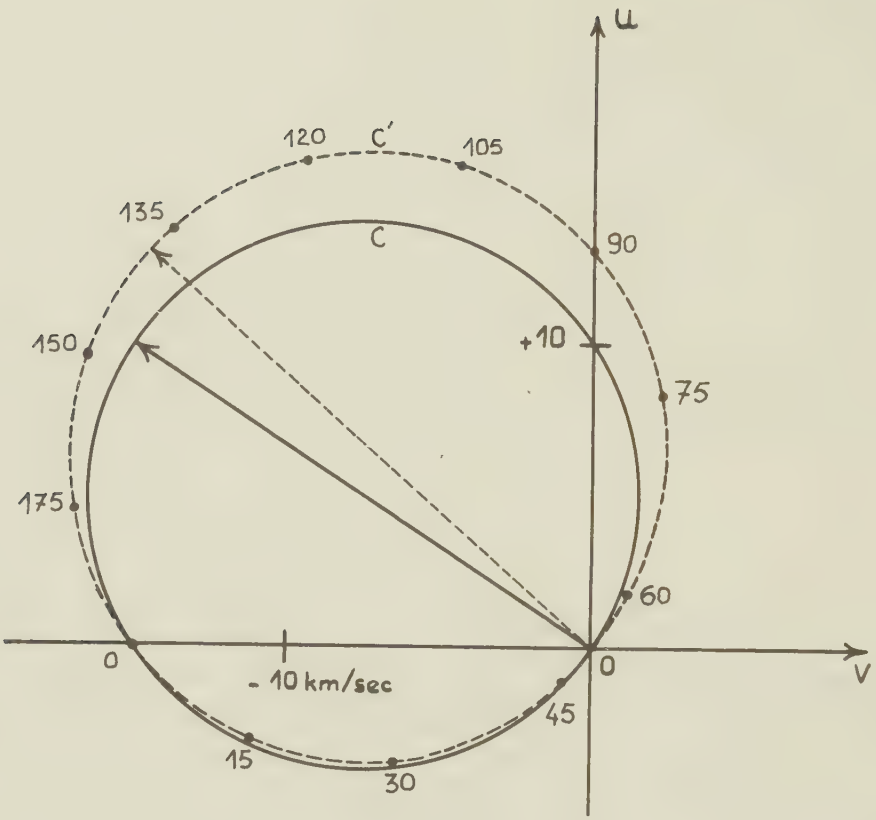


Fig. 26

## APPLICATION AU GROUPE LOCAL

### MATERIEL UTILISE -

Les données d'observations que nous utiliserons ont été réunies par J. O. Eggen (1961) dans un catalogue inclus dans une de ses récentes publications. Ce catalogue indique les coordonnées rectilignes $\mathcal{X}$, $\mathcal{Y}$, $\mathcal{Z}$ et les composantes $\mathcal{U}$, $\mathcal{V}$, $\mathcal{W}$ de la vitesse par rapport au soleil de 280 étoiles de type spectral B dont la magnitude apparente visuelle est inférieure à 5,5.

Sauf en ce qui concerne la magnitude absolue visuelle qui, dans le cas présent, a été déduite de la calibration type spectral-luminosité de H. L. Johnson et B. Iriartè (1958), les distances ont été évaluées en suivant une méthode identique à celle que nous avons décrite au chapitre I, à partir de données spectrophotométriques empruntées généralement aux mêmes sources. De même, les vitesses radiales proviennent pour la plupart des étoiles du catalogue de Wilson et ont été composées, le cas échéant, avec des déterminations plus récentes. Le matériel réuni par Eggen dans ce catalogue et celui que nous avons utilisé pour étudier les propriétés des vitesses radiales des étoiles jeunes, présentent donc une grande parenté, quant à leur élaboration.

Les mouvements propres provenant de diverses sources dont le General Catalogue (GC) ont été tous rapportés au système défini par le N 30 et corrigés, comme le recommandent H. R. Morgan et J. H. Oort (1951) de l'influence de la rotation différentielle sur la constante de la précession de Newcomb.

La figure 27 représente la distribution dans le plan radial ($\mathcal{X}$, $\mathcal{Z}$) perpendiculaire au plan galactique des étoiles du catalogue d'Eggen dont la vitesse radiale a pour qualité a, b ou c et qui sont situées à moins de 250 parsecs du soleil. Cette figure montre clairement l'inclinaison du Groupe Local par rapport au plan galactique.

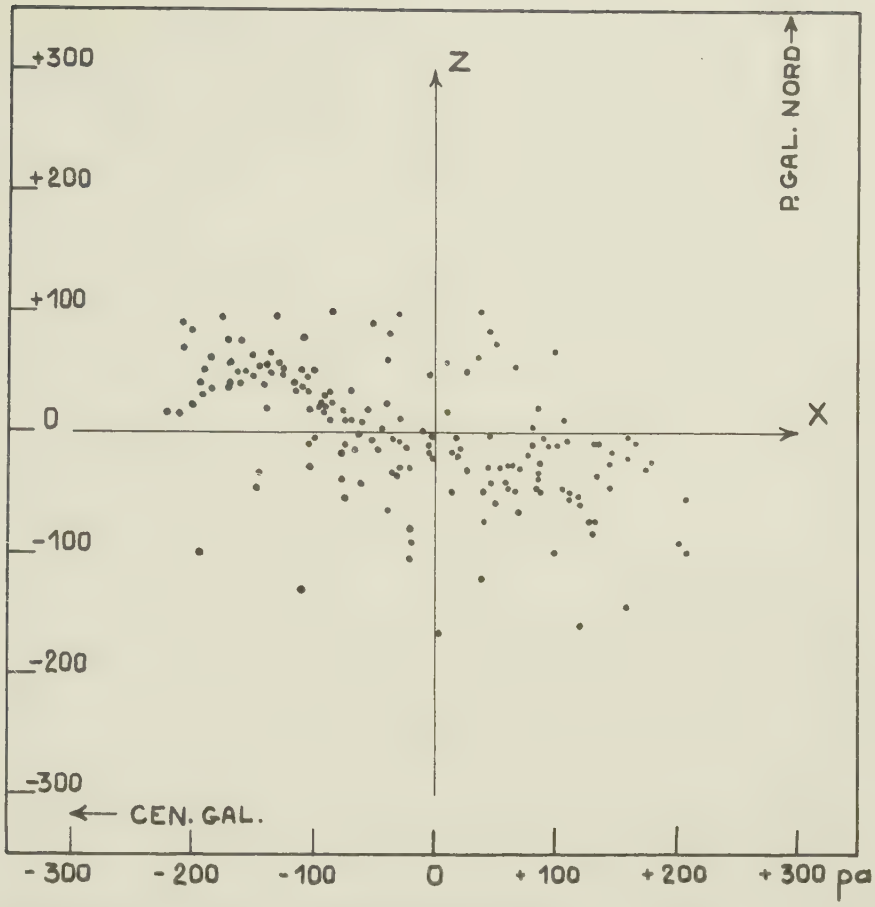
+300
+200
+100
0
-100
-200
-300
Z
X
P. GAL. NORD
CEN. GAL.
- 300
- 200
- 100
0
+ 100
+ 200
+ 300 parsecs

Fig. 27

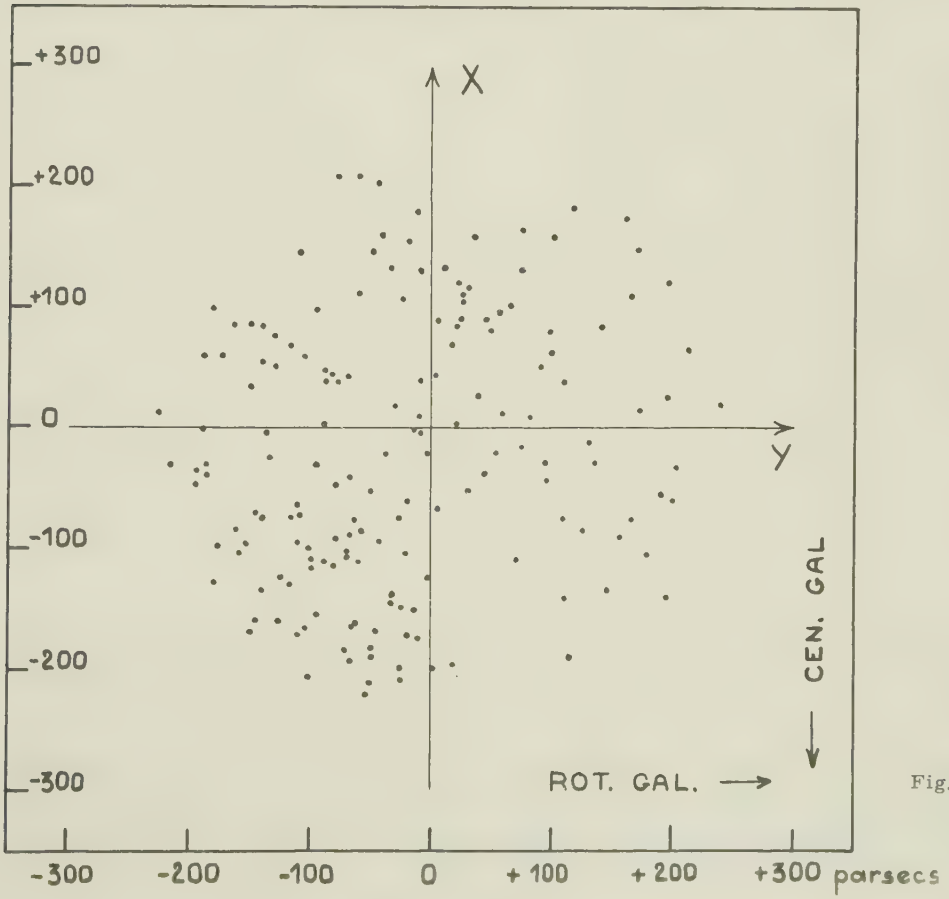
+300
+200
+100
0
-100
-200
-300
X
Y
CEN. GAL
ROT. GAL.
-300
-200
-100
0
+ 100
+ 200
+300 parsecs

Fig. 28

La répartition des projections des étoiles dans le plan galactique est représentée figure 28. On remarquera la nette concentration de celles-ci dans la région du Scorpion-Centaure ($\bar{\mathcal{X}} \# - 100$ pc, $\bar{\mathcal{Y}} \# - 100$ pc) ; concentration qui est peut-être accentuée, comme nous l'avons déjà signalé précédemment, par l'accumulation d'observations récentes dans une région présentant un grand intérêt depuis les travaux d'Ambarzoumian et de A. Blaauw.

## ESTIMATION DU TAUX D'EXPANSION k DANS DIFFERENTES DIRECTIONS Δ -

Les quantités $\rho'$ et $v'$ définies par les relations 22 et 23 ayant été calculées pour chaque étoile, l'estimation réelle du taux d'expansion k et du terme $v'_c$ pour une direction Δ donnée consiste, en principe, à ajuster une droite d'équation :

$$v' = v'_c + k\rho' \quad , \tag{27}$$

à travers le nuage de points de coordonnées $v'$ et $\rho'$.

L'aspect de ce nuage de points dans le plan ($v'$, $\rho'$) est indiqué figure 29, pour un angle de position γ de la direction Δ égal à 75°.

Cependant, cette méthode d'estimation, dans laquelle toutes les étoiles rentrent avec le même poids dans la recherche des inconnues n'est applicable que dans le cas d'une distribution quasi uniforme des étoiles dans le plan ($\mathcal{X}\mathcal{Y}$). Dans le cas présent, étant donné la forte concentration d'étoiles dans certaines régions, son application risque de fausser les valeurs des inconnues k et $v'_c$.

Pour ne pas donner un poids excessif à certaines régions riches en étoiles, il nous a semblé préférable d'utiliser la méthode d'estimation que nous allons décrire.

Le plan galactique a d'abord été partagé en un certain nombre de carrés d'égale surface, limités par des parallèles aux axes $O\mathcal{X}$ et $O\mathcal{Y}$, comme il est indiqué figure 30, et contenant un nombre suffisant d'étoiles pour permettre la définition d'un vecteur vitesse moyenne stable. Le nombre insuffisant d'étoiles dont nous disposons pour cette étude (164) nous a contraints de donner à ces carrés des dimensions assez grandes (75 pc de côté) et de rattacher à la région la plus voisine quelques étoiles isolées. Au total, 25 carrés ont été retenus. Le nombre d'étoiles dans chacun d'eux est indiqué figure 30. Les valeurs moyennes $\bar{\mathcal{X}}$, $\bar{\mathcal{Y}}$, $\bar{\mathcal{U}}$ et $\bar{\mathcal{V}}$ des coordonnées et des composantes de la vitesse des étoiles contenues dans chaque carré ont été ensuite calculées. Les estimations que nous nous proposons d'effectuer reposerons sur ces valeurs moyennes et non pas sur les valeurs individuelles des coordonnées et des composantes de la vitesse de chaque étoile.

La figure 31 montre la position et la vitesse dans le plan galactique des points de coordonnées $\bar{\mathcal{X}}$ et $\bar{\mathcal{Y}}$. Pour construire cette figure, les vitesses ont été corrigées de la vitesse du groupe par rapport au soleil en adoptant, pour représenter celle-ci, le vecteur de composante $\mathcal{U}_c = -10{,}8$ km. $s^{-1}$, $\mathcal{V}_c = 17{,}4$ km. $s^{-1}$. L'examen de cette figure montre nettement l'existence d'un mouvement d'expansion dans le Groupe Local.

Les valeurs du taux d'expansion k et du terme $v'_c$ estimées par la méthode des moindres carrés sont respectivement données dans la deuxième et dans la quatrième colonne du tableau 12.

Au sujet des estimations figurant dans ce tableau, nous devons faire deux remarques importantes:

1) La méthode d'estimation que nous avons utilisée impose à la droite d'équation :

$$v' = v'_c + k\rho' \tag{27}$$

de passer par le centre géométrique du nuage de points de coordonnées $v'$ et $\rho'$. Comme d'autre part, le décalage entre le centre des moyennes distances des 25 sous groupes retenus et la position du soleil est très faible (6 parsecs dans la direction du centre de la Galaxie et 2 parsecs dans la direction opposée à celle de la rotation galactique), les résultats donnés dans le tableau 12 ne sont valables que si l'on admet que la position du centre d'expansion du groupe est très voisine de celle du soleil. Dans cette hypothèse, la quantité $v'_c$ apparaît alors comme un terme qu'il est nécessaire d'introduire dans la relation (27) pour estimer k, mais qui ne présente pas d'autre intérêt en elle-même ; les composantes de la vitesse du groupe étant alors déduites directement des moyennes des composantes $\bar{\mathcal{U}}$ et $\bar{\mathcal{V}}$ des 25 sous groupes considérés :

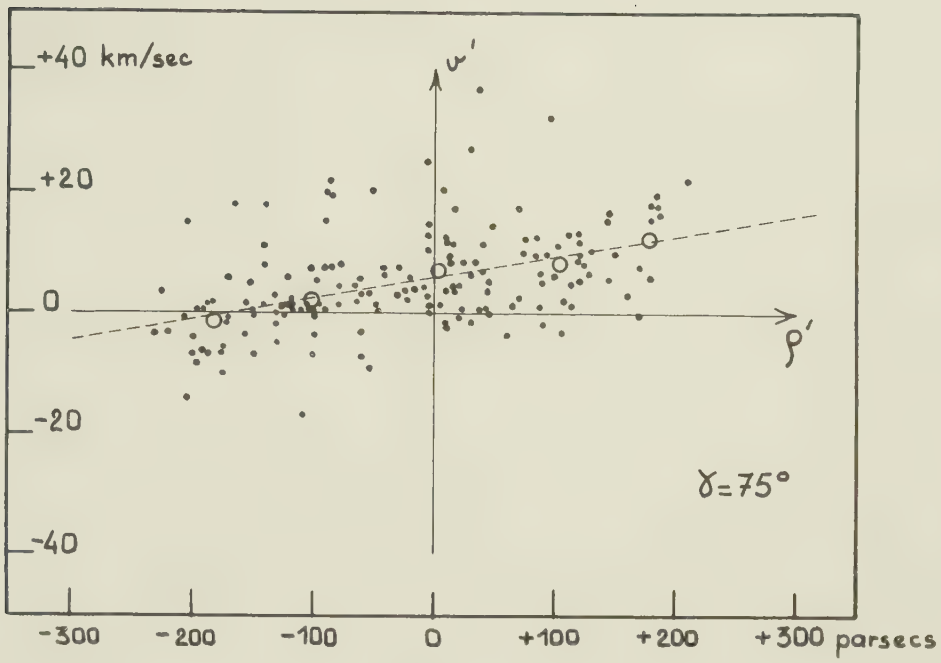
+40 km/sec
+20
0
-20
-40
w'
ρ'
γ=75°
-300
-200
-100
0
+100
+200
+300 parsecs

Fig. 29

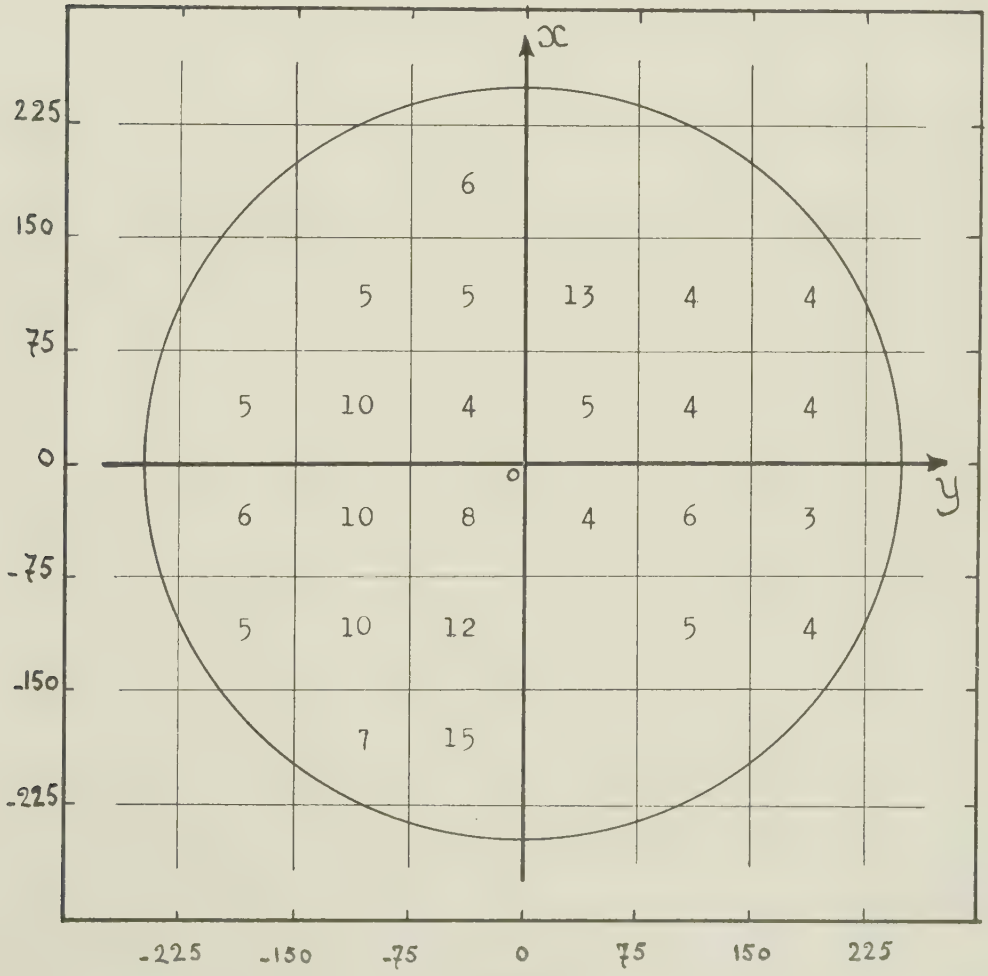
x
y
225
150
75
0
-75
-150
-225
6
5 5 13 4 4
5 10 4 5 4 4
6 10 8 4 6 3
5 10 12 5 4
7 15
-225
-150
-75
0
75
150
225

Fig. 30

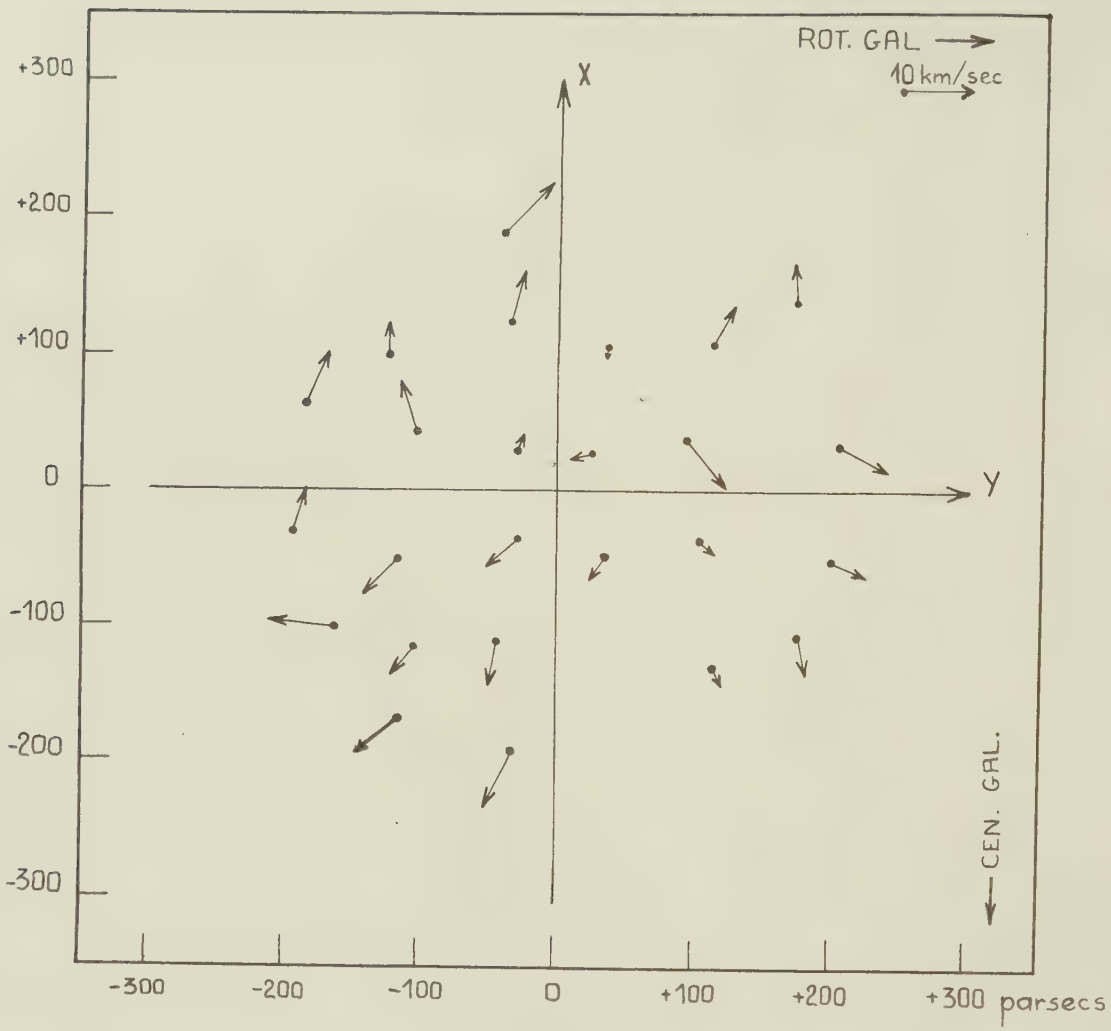


Fig. 31

$$\mathcal{U}_c = + 10,8 \pm 0,8. \text{ km. s}^{-1}$$
$$\mathcal{V}_c = - 17,4 \pm 0,9. \text{ km. s}^{-1}$$

Le léger écart entre la valeur de $\mathcal{U}_c$ et la valeur de $v_c'$ (11,0 km. $s^{-1}$) correspondant à $\gamma = 90°$ (axe O$\mathcal{X}$) est dû au décalage de 6 parsecs entre le centre des moyennes distances des 25 sous groupes et la position du soleil.

Les erreurs indiquées pour $\mathcal{U}_c$ et $\mathcal{V}_c$ ont été calculées après élimination du mouvement d'expansion dans les directions correspondantes. Elles doivent être comparées aux erreurs-types des moyennes brutes, soient :

1,2 km. $s^{-1}$, pour la composante $\mathcal{U}_c$

1,0 km. $s^{-1}$, pour la composante $\mathcal{V}_c$

2) Les estimations du taux d'expansion k pour différentes valeurs de $\gamma$ ne sont pas indépendantes. Il existe entre elles une relation fonctionnelle qui dépend de la méthode d'estimation utilisée ; en l'occurence la méthode des moindres carrés. Les estimations de k indiquées dans le tableau 12 ne sont donc que les valeurs calculées d'une même fonction de $\gamma$. Seules les valeurs de k estimées dans deux directions perpendiculaires sont indépendantes, par exemple : le taux d'expansion $k_x$ des vitesses $\mathcal{U}$ en fonction de $\mathcal{X}$ et le taux d'expansion $k_y$ des vitesses $\mathcal{V}$ en fonction de $\mathcal{Y}$.

Tableau 12

| $\gamma$ | k en km. $s^{-1}$ $kpc^{-1}$ | | $v'_c$ en km. $s^{-1}$ |
|---|---|---|---|
| | groupe local | modèle ($40,4 \times 10^6$ ans) | |
| 0° | 16,5 | 18,7 | - 17,4 |
| 15 | 16,3 | 15,7 | - 14,0 |
| 30 | 18,1 | 17,2 | - 9,6 |
| 45 | 21,9 | 22,9 | - 4,6 |
| 60 | 27,2 | 29,0 | + 0,8 |
| 75 | 33,3 | 32,9 | + 6,1 |
| 90 | 38,1 | 34,6 | + 11,0 |
| 105 | 38,8 | 34,5 | + 15,1 |
| 120 | 35,9 | 33,2 | + 18,2 |
| 135 | 29,6 | 30,8 | + 20,0 |
| 150 | 23,4 | 27,5 | + 20,5 |
| 165° | 18,8 | 23,0 | + 19,6 |

Estimation du taux d'expansion k du Groupe Local dans différentes directions. Comparaison avec le taux d'expansion d'un modèle âgé de $40,4 \times 10^6$ ans.

Nous n'aborderons pas ici tous les problèmes que pose l'estimation du taux d'expansion et de la vitesse du groupe par rapport au soleil ; cela sortirait du cadre de notre étude, c'est-à-dire, l'interprétation du terme K introduit dans la relation 19 du chapitre II. Notre but est de montrer ici que la distribution des vitesses des étoiles du Groupe Local s'interprète d'une façon satisfaisante si l'on suppose l'existence d'un mouvement d'expansion à l'intérieur de ce Groupe.

La variation du taux d'expansion k d'un groupe théorique en expansion avec l'angle de position $\gamma$ de la direction $\Delta$ a été étudiée page 299. Cette variation, fonction de l'âge du groupe, est représentée figure 23. L'estimation de l'âge du Groupe Local sera abordée au paragraphe suivant ; nous serons alors conduits à des valeurs peu différentes (compte tenu de leur incertitude) de $40 \times 10^6$ ans. Un âge supposé de $40,4 \times 10^6$ ans étant d'un emploi commode pour les calculs ($\chi t$ prend alors la valeur simple de 75°), la variation théorique calculée pour cet âge a été superposée à la courbe empirique représentant la variation du taux d'expansion du Groupe Local en fonction de l'angle $\gamma$.

L'accord satisfaisant que met en évidence la figure 32 nous semble constituer un argument nettement favorable à l'existence d'un mouvement d'expansion dans le Groupe Local.

ESTIMATION DE L'AGE DU GROUPE -

Les valeurs du taux d'expansion $k_y$ et du rapport $\mathcal{R} = k_x/k_y$ ont été proposées page 303 pour estimer l'âge du groupe, par comparaison aux valeurs théoriques indiquées dans le diagramme de la figure 24. Ces indicateurs d'âge ont été proposés pour des raisons indiquées précédemment mais aussi parce que les taux d'expansion $k_x$ et $k_y$ sont indépendants.

Ces deux procédés conduisent aux valeurs suivantes pour l'âge du groupe :

- taux d'expansion $k_y$ = 16,5 km. $s^{-1}$ $kpc^{-1}$ ..... $35 \times 10^6$ ans
- rapport $k_x/k_y$ : $\mathcal{R}$ = 3,2 ..... $50 \times 10^6$ ans.

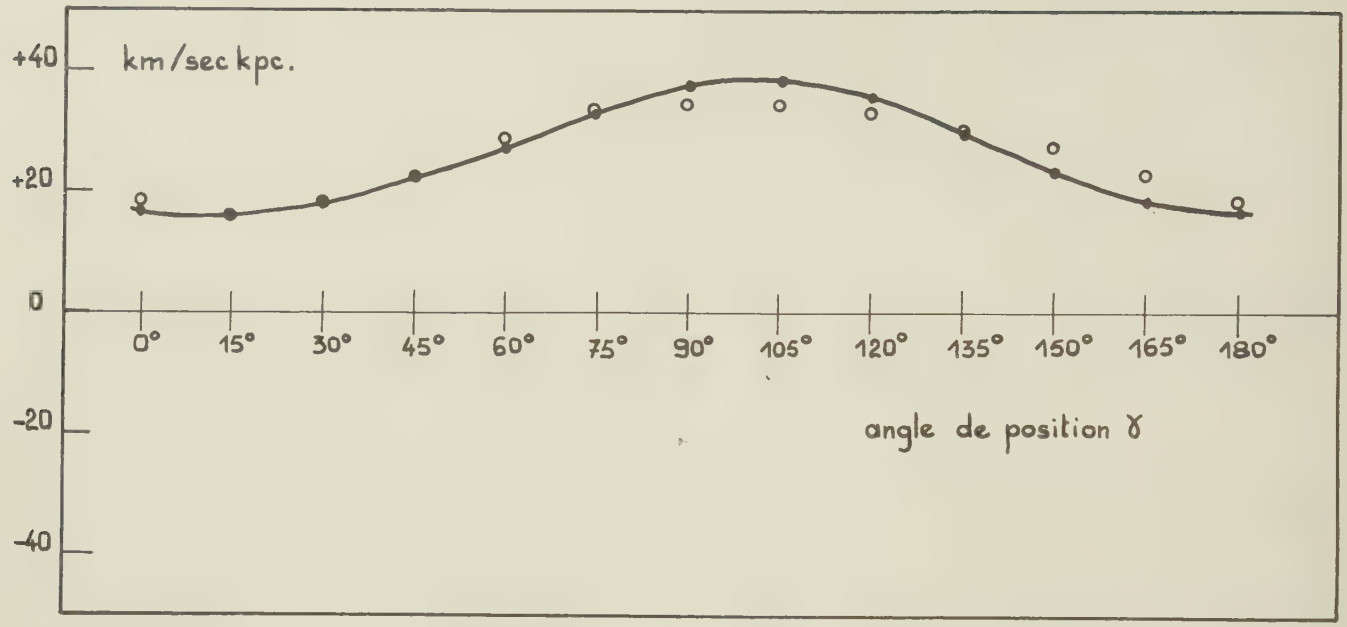


Fig. 32

La différence entre ces deux estimations est relativement importante, mais elle n'est pas excessive. En effet, de nombreuses causes d'erreurs interviennent dans celles-ci ; elles sont, principalement :

a) l'incertitude des distances évaluées,

b) les erreurs systématiques des mouvements propres (en fonction de la déclinaison, puisque le plan de Gould est fortement incliné par rapport au plan de l'équateur),

c) les erreurs systématiques des vitesses radiales,

d) la confusion de la position du centre d'expansion du groupe avec celle du soleil,

e) l'assimilation du Groupe Local au modèle probablement trop simple d'un groupe unique en expansion,

f) la présence d'un certain nombre d'étoiles n'appartenant pas au groupe considéré.

D'autre part, les deux valeurs trouvées pour l'âge du groupe ne sont pas incompatibles avec ce que l'on sait de l'échelle de temps d'évolution des étoiles des types considérés ; l'âge d'expansion d'un groupe étant toujours nettement supérieur aux âges individuels des étoiles qui le composent.

Compte tenu de ces remarques, il nous semble raisonnable de proposer pour le Groupe Local un âge de 40 millions d'années, défini à 20 ou 25 pour cent près.

## REMARQUES SUR UNE OBJECTION DEJA FAITE A LA REALITE DE L'EXPANSION DANS CERTAINS GROUPES D'ETOILES

La réalité des mouvements d'expansion dans certains groupes d'étoiles appartenant au Groupe Local a été souvent contestée, en particulier dans l'association du Scorpion-Centaure. J.O. Eggen notamment, dans l'article auquel nous avons emprunté les données d'observation utilisées dans ce chapitre, signale que la confirmation apportée par F.C. Bertiau (1958) au mouvement d'expansion

dans le Scorpion-Centaure repose surtout sur l'existence d'un important gradient des composantes $\mathfrak{U}$ des vitesses en fonction de $\mathfrak{X}$ dans cette région. Il estime que le gradient peut être expliqué, sans faire appel à un mouvement d'expansion, par la présence d'erreurs systématiques des mouvements propres en fonction de la déclinaison et par l'incertitude des distances des étoiles.

Remarquant la faible dispersion des composantes $\mathfrak{V}$ des vitesses, il propose alors, pour s'affranchir de ces erreurs, de calculer la distance et la composante $\mathfrak{U}$ de la vitesse de chaque étoile en imposant à $\mathfrak{V}$ d'être égal à la valeur moyenne $\mathfrak{V}_c$ évaluée en prenant en considération toutes les étoiles du groupe. Cela revient à admettre qu'il n'existe aucun effet systématique dans les composantes $\mathfrak{V}$ et que la dispersion de celles-ci est uniquement due aux erreurs accidentelles des déterminations astronomiques. J.O. Eggen justifie l'application de cette méthode en montrant que :

1) le diagramme Magnitude absolue - Indice de couleur déduit des distances ainsi évaluées ne présente pas de différences appréciables avec le diagramme de même nature que l'on peut déduire des mesures de parallaxes de F.C. Bertiau,

2) le gradient des composantes $\mathfrak{U}$ de la vitesse en fonction de $\mathfrak{X}$ disparaît presque complètement.

La première remarque doit être regardée plus comme une condition nécessaire à la validité de la méthode utilisée que comme une justification de celle-ci. La seconde est plus positive. Mais avant d'en tirer parti, il est bon de s'assurer que la méthode utilisée par J.O. Eggen ne conduit pas obligatoirement à un tel résultat. En d'autres termes, on doit se poser la question suivante :

- le fait d'annuler arbitrairement le gradient des vitesses suivant l'axe $O\mathfrak{Y}$ ne conduit-il pas à réduire considérablement et nécessairement le taux d'expansion du groupe dans la direction $O\mathfrak{X}$?

Pour répondre à cette question, nous reprendrons les calculs d'Eggen en admettant, pour simplifier, que les étoiles du groupe considéré et les vitesses de celles-ci sont contenues dans le plan galactique ($\mathfrak{Z} = 0$, $\mathfrak{W} = 0$).

Soient donc $\mathfrak{X}$ et $\mathfrak{Y}$ les coordonnées d'une étoile et $\mathfrak{U}$, $\mathfrak{V}$ les composantes de sa vitesse par rapport au soleil. Comme précédemment nous désignerons par U et V les composantes de la vitesse particulière de cette étoile par rapport au centre C du groupe et par $\mathfrak{X}_c$, $\mathfrak{Y}_c$ et $\mathfrak{U}_c$, $\mathfrak{V}_c$ les coordonnées et les composantes de la vitesse de C par rapport au soleil :

$$\mathfrak{U} = \mathfrak{U}_c + U$$

$$\mathfrak{V} = \mathfrak{V}_c + V$$

Habituellement, on calcule ces quantités à partir des déterminations astronomiques de la distance r, des mouvements propres $\mu$ et de la vitesse radiale R, à l'aide des relations :

$$\mathfrak{X} = - r \cos l'', \qquad \mathfrak{Y} = r \sin l'' \tag{28}$$

$$T = \varepsilon \mu_l r \tag{29}$$

$$\mathfrak{U} = - R \cos l'' + T \sin l'', \qquad \mathfrak{V} = R \sin l'' + T \cos l'', \tag{30}$$

dans lesquelles T désigne la vitesse tangentielle de l'étoile, $\varepsilon$ un facteur d'unités ($\varepsilon = 4,74$, si T est exprimé en km. $s^{-1}$, r en parsecs et le mouvement propre en longitude $\mu_l$ en secondes de degré par an).

Si maintenant, comme le fait Eggen, on suppose $\mathfrak{V}$ peu différent de sa valeur moyenne et r inconnu, on peut calculer des valeurs approchées $\mathfrak{X}'$, $\mathfrak{Y}'$ et $\mathfrak{U}'$ des quantités $\mathfrak{X}$, $\mathfrak{Y}$ et $\mathfrak{U}$ par les relations suivantes qui se déduisent aisément des relations (28), (29), (30) :

$$\mathfrak{X}' = - \frac{\mathfrak{V}_c - R \sin l''}{\varepsilon \mu_l} \tag{31}$$

$$\mathfrak{Y}' = \frac{\mathfrak{V}_c - R \sin l''}{\varepsilon \mu_l} \operatorname{tg} l'' \tag{32}$$

$$\mathfrak{U}' = \frac{\mathfrak{V}_c \sin l'' - R}{\cos l''} \tag{33}$$

Remarquons que les incertitudes portant sur les mouvements propres ne sont pas éliminées pour autant des estimations de $\mathfrak{x}'$ et $\mathfrak{y}'$. En revanche, le mouvement propre individuel n'intervient plus directement dans l'évaluation de la composante $\mathfrak{u}'$, mais seulement dans la moyenne $\mathfrak{v}_c$, avec un poids d'autant plus faible que le groupe est plus peuplé.

Ces relations peuvent aussi s'écrire sous la forme :

$$\mathfrak{x}' - \mathfrak{x} = + \frac{V}{\varepsilon \mu_l} = V \frac{r}{T} \tag{31'}$$

$$\mathfrak{y}' - \mathfrak{y} = - V \frac{r}{T} \operatorname{tg} l'' \tag{32'}$$

$$\mathfrak{u}' - \mathfrak{u} = - V \operatorname{tg} l'' , \tag{33'}$$

qui se prête mieux aux calculs numériques, quand les quantités $\mathfrak{x}$, $\mathfrak{y}$, $\mathfrak{u}$ et r/T sont connues par ailleurs.

Considérons maintenant un groupe fictif, âgé de 48,6 millions d'années, en expansion dans le champ de forces galactique. Le centre de ce modèle est placé au voisinage du centre du Scorpion-Centaure ($\mathfrak{x}_c$ = - 120 pc, $\mathfrak{y}_c$ = - 80 pc) et est animé, par rapport au soleil d'une vitesse de composantes $\mathfrak{u}_c$ = + 10 km. $s^{-1}$, $\mathfrak{v}_c$ = - 20 km. $s^{-1}$. Pour donner à ce modèle des dimensions comparables à celles du Scorpion-Centaure nous considèrerons à la fois les membres dont les vitesses initiales sont égales à 1 km. $s^{-1}$ et 2 km. $s^{-1}$ et qui font avec l'axe O$\mathfrak{y}$ des angles $\varphi$ égaux à 0°, 45°, 90°...325° (fig. 33).

Les figures 34a et 34b permettent de comparer le taux d'expansion réel du modèle dans la direction de l'axe O$\mathfrak{x}$ (fig. 34a) au taux obtenu en calculant $\mathfrak{u}'$ et $\mathfrak{x}'$ par les relations 31' et 33' (fig. 34b). Le point de coordonnées $\mathfrak{x}'$ = + 10,0 pc, $\mathfrak{u}'$ = - 32,5 km. $s^{-1}$ correspondant au membre dont les conditions initiales sont $s_o$ = 2 km. $s^{-1}$, $\varphi$ = 45° n'a pu être porté sur le diagramme.

On constate que, dans le cas considéré, le fait d'assigner à chaque composante $\mathfrak{v}$ la valeur moyenne $\mathfrak{v}_c$ réduit considérablement le gradient des vitesses $\mathfrak{u}$ en fonction de $\mathfrak{x}$ et diminue sensiblement la valeur moyenne $\mathfrak{u}_c$ des composantes $\mathfrak{u}$. Ce dernier effet peut être retrouvé du reste en comparant les diagrammes des figures 8 et 10 de l'article d'Eggen.

L'estimation du gradient des vitesses $\mathfrak{u}'$ en fonction de $\mathfrak{x}'$ a été effectuée par la méthode des moindres carrés. Si l'on tient compte de tous les membres du groupe fictif, y compris celui dont le point représentatif n'a pu être placé sur le diagramme de la figure 34b, cette méthode conduit à une valeur négative inadmissible du gradient k' des vitesses. Ce membre sortant peut-être des limites réelles du Scorpion-Centaure, nous avons préféré l'éliminer. Mais, pour maintenir une certaine concordance entre la répartition des membres du modèle et la répartition réelle des étoiles du Scorpion-Centaure,nous avons été conduits à doubler le poids du membre dont les conditions initiales sont : $s_o$ = 2 km. $s^{-1}$, $\varphi$ = 90°. Le membre éliminé et le membre dont le poids a été doublé sont respectivement indiqués par une petite flèche et par un double point sur les diagrammes. On trouve alors, pour le gradient des vitesses :

$$k' = + 13 \text{ km. } s^{-1} \text{ kpc}^{-1}$$

la valeur moyenne $\mathfrak{u}'_c$ des composantes $\mathfrak{u}'$ étant :

$$\mathfrak{u}'_c = + 8,9 \text{ km. } s^{-1}.$$

On voit donc que le facteur de réduction du taux d'expansion dépend beaucoup de la répartition spatiale des membres du groupe. Cela, non seulement par l'intermédiaire du facteur tg $l''$ mais aussi par l'intermédiaire de la composante tangentielle T qui, les vitesses particulières étant petites, peut être confondue, en première approximation, avec la projection de la vitesse d'ensemble du groupe sur la perpendiculaire à la direction héliocentrique de l'étoile. En particulier, la méthode décrite ci-dessus conduit à des résultats sans rapport avec la réalité dans le cas où la direction moyenne du groupe et ses dimensions sont telles que le facteur tg $l''$ soit en moyenne très grand ou telles que la vitesse tangentielle T soit voisine de zéro.

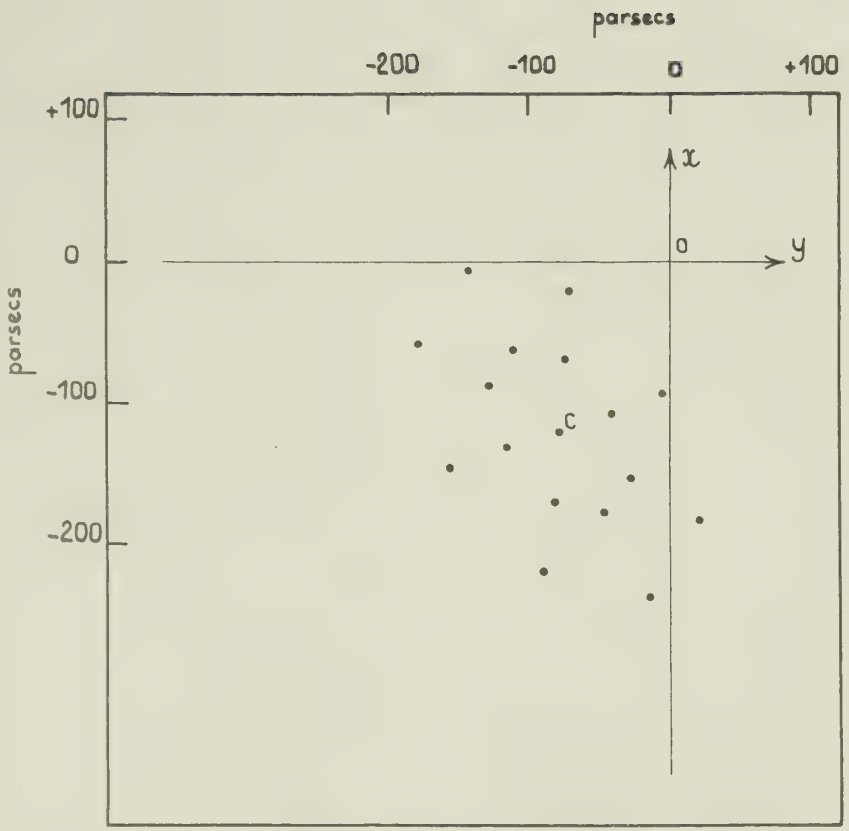


Fig. 33

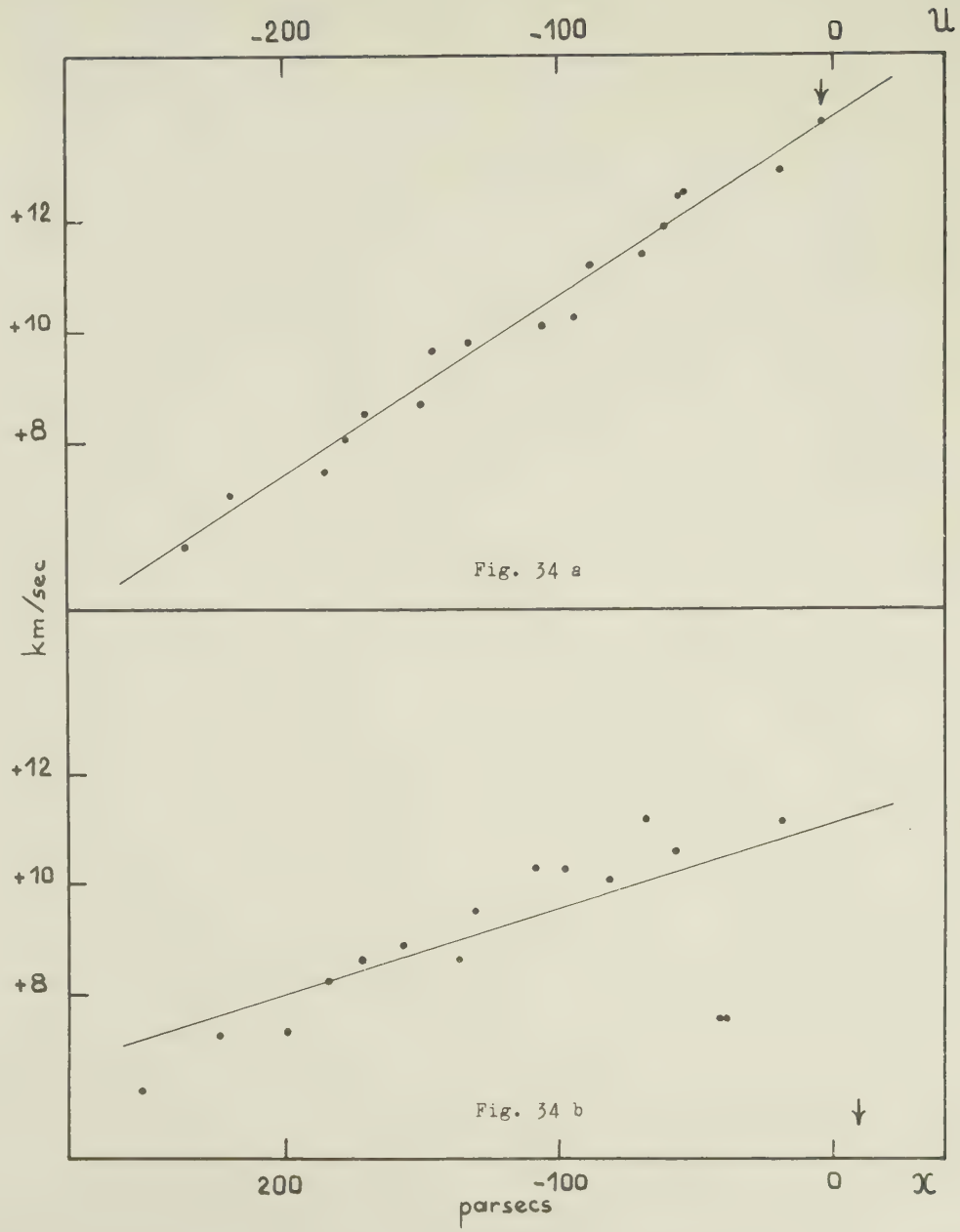


Fig. 34 a

Fig. 34 b

Fig. 34

La méthode utilisée par Eggen conduit donc nécessairement, dans le cas du Scorpion-Centaure, à une réduction considérable du gradient des vitesses dans la direction OX. Le facteur de réduction de ce gradient est difficilement calculable avec précision mais il ne semble pas exagéré d'admettre qu'il est au moins égal à 2,5.

## INTERPRETATION DU TERME K DE LA RELATION (19, ch. II)

Un examen attentif des figures 15a, 15b, 15c, 15d qui montrent la variation avec la distance de la vitesse radiale $R_c$ des étoiles de notre catalogue, permet de déceler, en plus de l'effet déjà reconnu, l'existence d'un gradient des vitesses radiales en fonction de r qui intéresse les étoiles situées à moins de 500 parsecs du soleil. Ce nouvel effet semble devoir être rattaché à l'existence du mouvement d'expansion que nous venons d'étudier dans le Groupe Local.

Ce mouvement d'expansion n'est pas décelable sur le diagramme de la figure 15e du secteur S.5. Mais si l'on se rapporte à la figure 28 qui indique la répartition dans le plan galactique des étoiles du Groupe Local on constate que la région correspondant à ce secteur est particulièrement dépeuplée. Il est donc possible que, dans ce secteur, le rapport du nombre des membres du groupe en expansion à celui des étoiles de champ soit trop faible pour que l'expansion puisse être décelée.

Pour les quatre secteurs dans lesquels ce mouvement est décelable, le taux d'expansion est nettement plus faible que le taux qui vient d'être déduit de l'étude des vitesses spatiales des étoiles O et B situées à moins de 250 parsecs du soleil. Mais, le plan de symétrie du système de Gould étant incliné de 20 degrés par rapport au plan galactique, il est possible qu'un nombre relativement important d'étoiles de champ entraîne une sous-estimation du taux d'expansion. La comparaison du gradient de vitesse décelé sur les figures 15 au gradient déduit de l'étude du Groupe Local ne sera donc possible qu'en considérant seulement les étoiles situées au voisinage du plan de Gould.

Malheureusement, le système de Gould n'a pas une épaisseur bien définie (particulièrement dans la région étudiée ici) et la sélection que nous nous proposons d'effectuer s'en trouvera toujours plus ou moins arbitraire.

La sélection opérée est la suivante :

- pour les secteurs S.1 et S.2, qui sont situés au voisinage du noeud du cercle de Gould dans le cercle galactique, toutes les étoiles situées à moins de 500 parsecs ont été retenues, quelle que soit leur latitude,

- pour les secteurs S.3 et S.4, seules les étoiles de latitude négative dont la distance est inférieure à 500 parsecs ont été considérées.

Nous indiquons dans la dernière colonne du tableau 13 la variation de la vitesse radiale moyenne $R_c$ de ces étoiles groupées par tranche de 100 parsecs. Les trois premières colonnes du tableau indiquent respectivement : l'intervalle de distance considéré, la distance moyenne et le nombre d'étoiles contenues dans chaque intervalle.

Les vitesses radiales $\overline{R}_c$ ont été corrigées de la différence entre la vitesse du soleil qui a été déduite de l'étude du Groupe Local (page 312) et celle que nous avions adoptée au chapitre II (voir pages 270 et 271).

La variation de la vitesse radiale moyenne $\overline{R_c}$ avec la distance est très nette. Cependant le taux d'expansion que l'on en déduit ($k \# 18$ km. $s^{-1}kpc^{-1}$) est encore nettement plus faible que le taux d'expansion moyen de la région correspondante du Groupe Local ($k \# 27$ km. $s^{-1}kpc^{-1}$).

Les remarques faites précédemment au sujet de la sélection ne permettent pas de discuter d'une manière approfondie l'écart observé entre l'expansion qui vient d'être mise en évidence et celle qui a été trouvée pour le Groupe Local. Il semble bien cependant qu'il existe au voisinage du soleil un mouvement d'expansion qui affecte le système des étoiles O et B jusqu'à 500 parsecs environ de celui-là. Le terme K introduit dans la relation (19) doit donc être interprété comme représentant l'effet moyen de l'expansion observée.

Tableau 13

| intervalle de distance en pc | distance moyenne en pc | nombre d'étoiles | vitesse radiale moyenne $\overline{R}_c$ en km. $s^{-1}$ |
|---|---|---|---|
| 0 à 100 | 70 | 16 | - 0,3 |
| 100 à 200 | 150 | 60 | + 1,0 |
| 200 à 300 | 250 | 63 | + 3,6 |
| 300 à 400 | 350 | 60 | + 4,5 |
| 400 à 500 | 440 | 39 | + 6,4 |

## RETOUR A L'EFFET DE QUALITE

Un effet systématique a été constaté dans le tableau 6 et sur les figures 9a et 9b du chapitre I où nous indiquons les valeurs moyennes des vitesses $R_c$ calculées à la fois par secteur et par groupe de qualité. Cet effet peut être décomposé en deux termes, suivant que le tableau 6 est examiné par colonne ou par ligne.

Dans le premier cas (fig. 9b), on constate que la vitesse radiale moyenne $\overline{R}_c$ varie avec la longitude, d'une manière qui dépend peu de la qualité, les plus grandes vitesses étant observées dans les secteurs S. 3 et S. 4. Or, nous avons montré que l'expansion du Groupe Local admettait une direction privilégiée, voisine de celle de l'anticentre. Qualitativement, il semble donc possible de rendre compte de l'allure générale des courbes de la figure 9b par les propriétés du mouvement d'expansion au voisinage du soleil.

Si l'on examine maintenant le tableau 6 par ligne (fig. 9a), on constate un autre type de variation, à savoir, une décroissance de la vitesse radiale moyenne quand la qualité varie de a à d et e. Les propriétés représentées sur la figure 8 concernant la répartition des étoiles en fonction de leur distance au soleil et de la qualité de leur vitesse radiale permettent de penser que, s'il était possible d'éliminer de chaque courbe de la figure 9a l'effet dû à l'expansion, la variation des vitesses radiales en fonction de la qualité serait atténuée. Il ne semble pas cependant que l'expansion décelée au voisinage du soleil puisse expliquer la totalité de l'effet constaté et la présente étude ne permet pas d'interpréter la corrélation résiduelle en termes de structure galactique.

Il peut s'agir alors d'erreurs systématiques de mesures. Dans ce cas, la figure 9a mettrait en évidence une corrélation réelle entre l'erreur systématique et la précision des vitesses radiales . Une telle corrélation n'est peut-être pas impossible.

# CONCLUSIONS

Nous nous bornerons à récapituler les résultats obtenus au cours de cette étude et, plus particulièrement, ceux qui nous semblent être les mieux établis.

L'interprétation du mouvement d'expansion au voisinage du soleil doit être rattachée à l'existence d'une anomalie dans la distribution spatiale des étoiles O et B entourant le soleil, le Groupe Local. Ce groupe peut être considéré comme une "super-association" en expansion dans le champ de forces galactique. L'estimation de l'âge du Groupe Local par la méthode proposée est en bon accord avec ce que l'on sait d'autre part du temps d'évolution physique des étoiles O et B et de l'âge d'expansion des associations stellaires.

Le mouvement de rapprochement qui affecte les étoiles lointaines situées au voisinage de l'anticentre a pu être confirmé par l'étude de la variation de la largeur du profil de la raie 21 cm de l'hydrogène interstellaire. Il semble bien que ce mouvement intéresse un bras spiral situé à environ 2 000 parsecs du soleil et qui peut être identifié avec le bras de Persée du schéma classique adopté pour décrire la structure de la répartition des étoiles O et B.

Nous avons rencontré, au cours de cette étude, quelques difficultés que nous n'avons pas été en mesure de résoudre comme nous l'aurions souhaité. Nous espérons pouvoir revenir bientôt sur certaines d'entre elles, notamment sur celles qui sont en relation avec la structure et les mouvements du Groupe Local qui a été abordé ici d'un point de vue très particulier.

# BIBLIOGRAPHIE


BAADE W., (1955) - Transactions of the I.A.U., Vol. IX, Commission 33.

BLAAUW A., (1952) - B.A.N. 11, n° 433, p. 414.

BLAAUW A., (1963) - Stars and Stellar Systems, Vol. III, ch. 20, p. 383.

BERTIAU F.C., (1958) - Ap. J. 128, p. 533.

BONNEAU M., (1963) - C.R. Acad. des Sc., t. 256, p. 1923.

BOUIGUE R., (1959) - Ann. Obs. Toulouse, t. XXVII, p. 47.

BOULON J., (1963) - J.O., Vol. 46, n° 8-9-10-11.

DELHAYE J., (1963) - Stars and Stellar Systems, Vol. V, (Galactic Structure), ch. 5, (sous presse).

EGGEN O.J., (1961) - Royal Observatory Bull., n° 41.

FEAST M.W. et THACKERAY A.D., (1958) - M.N.R.A.S. 118, p. 125.

FILIN A.J., (1957) - A.J. S.S.S.R. 34, n° 4, p. 525.

HILTNER W.A., (1956) - Ap. J. suppl. 2, p. 389.

JOHNSON H.L., (1958) - Bull. Lowell Obs., Vol. IV, n° 93, p. 37.

JOHNSON H.L. et IRIARTE B., (1958) - Bull. Lowell Obs., Vol. IV, n° 91, p. 47.

JOHNSON H.L. et MORGAN W.W., (1953) - Ap. J. 117, n° 3, p. 313.

KRAFT R.P. et SCHMIDT M., (1963) - Ap. J. 137, n° 1, p. 249.

MORGAN H.R. et OORT J.H., (1951) - B.A.N. 11, n° 431, p. 379.

MORGAN W.W., HARRIS D.L. et JOHNSON H.L., (1953) - Ap. J. 118, p. 92.

MORGAN W.W., WHITFORD A.E. et CODE A.D., (1953) - Ap. J. 118, p. 318.

MORGAN W.W., CODE A.D. et WHITFORD A.E., (1955) - Ap. J. suppl. 2, p. 41.

MULLER C.A. et WESTERHOUT G., (1957) - B.A.N., Vol. XIII, n° 475, p. 151.

OSAWA K., (1959) - Ap. J. 130, p. 159.

OSAWA K., HATAS S., (1960) - Ann. Tokyo, Astr. Obs. Vol. VI, n° 4, p. 148.

OSAWA K. et HATAS S., (1962) - Ann. Tokyo, Astr. Obs. Vol. VII, n° 4, p. 209.

PARENAGO P.P., (1951) - Pub. Sternberg 20, p. 26.

PETRIE R.M. et PEARCE J.A., (1962) - Pub. Dom. Astrophys. Obs. Victoria, Vol. XII, n° 1.

SCHMIDT M., (1956) - B.A.N. 13, n° 468, p. 15.

SHAPLEY H. et CANNON A.J., (1924) - Harvard Observatory, Reprint n° 6, p. 215.

STEBBINS J., HUFFER C.M. et WHITFORD A.E., (1940) - Ap. J. 91, n° 1, p. 20.

Union Astronomique Internationale, (1963) - Information Bull. n° 11.

VAN DE HULST H.C., MULLER C.A. et OORT J.H. (1954)-B.A.N. *12* , n° 452, p.117

WALRAVEN Th., MULLER A.B. et OOSTERHOFF P. Th., (1958) - B.A.N. 14, n° 484, p. 81.

WILSON R.E., (1953) - Paper of the Mount Wilson Obs., Vol. VIII.

# TABLE DES MATIÈRES


| | Pages | Pages |
|---|---|---|
| INTRODUCTION | 251 | 5 |
| CHAPITRE I - CATALOGUE D'ETOILES O ET B | 253 | 7 |
| Elaboration du catalogue | 253 | 7 |
| - Vitesses radiales | 253 | 7 |
| - Classification M.K. et photométrie | 255 | 9 |
| Précision du catalogue | 259 | 13 |
| - Evaluation de l'écart-type de la distance des étoiles | 259 | 13 |
| - Répartition des étoiles dans le plan galactique | 262 | 16 |
| - Répartition de la précision des vitesses radiales en fonction de la distance | 264 | 18 |
| Composition définitive du matériel étudié | 269 | 23 |
| CHAPITRE II - ETUDE DES PROPRIETES CINEMATIQUES DES ETOILES O ET B | 270 | 24 |
| Effet du mouvement du soleil et de la rotation galactique différentielle sur les vitesses radiales | 270 | 24 |
| - Effet du mouvement du soleil | 270 | 24 |
| - Effet de la rotation galactique différentielle | 271 | 25 |
| - Valeur adoptée pour la distance du soleil au centre de la Galaxie | 274 | 28 |
| Détermination de la constante A | 275 | 29 |
| - Influence des erreurs des distances des étoiles sur la détermination de la constante A | 276 | 30 |
| Ecarts systématiques au mouvement circulaire | 278 | 32 |
| - Etude préliminaire | 278 | 32 |
| - Résultats de l'étude définitive | 281 | 35 |
| - Discussion des résultats obtenus | 281 | 35 |
| Mouvements systématiques de l'hydrogène interstellaire dans la direction de l'anticentre galactique | 287 | 41 |

| | Pages | Pages |
|---|---|---|
| - Estimation du terme k pour l'hydrogène | 290 | 44 |
| - Distribution de l'hydrogène interstellaire | 290 | 44 |
| - Distribution des étoiles O et B | 292 | 46 |
| CHAPITRE III - ETUDE DES PROPRIETES CINEMATIQUES DU GROUPE LOCAL | 293 | 47 |
| Mouvement des étoiles dans le plan galactique | 293 | 47 |
| - Application à l'évolution des associations stellaires | 295 | 49 |
| Propriété caractéristique de la distribution des vitesses des membres d'un groupe en expansion | 297 | 51 |
| - Taux d'expansion d'un groupe d'étoiles dans une direction $\Delta$ donnée | 299 | 53 |
| - Estimation de l'âge du groupe | 303 | 57 |
| - Vitesse du groupe par rapport au soleil | 304 | 58 |
| Application au Groupe Local | 308 | 62 |
| - Matériel utilisé | 308 | 62 |
| - Estimation du taux d'expansion k dans différentes directions $\Delta$ | 310 | 64 |
| - Estimation de l'âge du groupe | 313 | 67 |
| Remarques sur une objection déjà faite à la réalité de l'expansion dans certains groupes d'étoiles | 314 | 68 |
| Interprétation du terme K de la relation (19, ch. II) | 318 | 72 |
| Retour à l'effet de qualité | 319 | 73 |
| CONCLUSIONS | 320 | 74 |
| BIBLIOGRAPHIE | 321 | 75 |

DEUXIEME THESE

Propositions données par la Faculté

# LES IRREGULARITES DE LA ROTATION DE LA TERRE, CONSIDEREES COMME PHENOMENES ALEATOIRES.

Vu et approuvé
Besançon, le 24 juin 1964.
Le Doyen de la Faculté des Sciences,
R. JACQUEMAIN

Vu
et Permis d'imprimer :
Le Recteur, Président du Conseil de l'Université
H. GAUTHIER

IMPRIMERIE LOUIS-JEAN
Ouvrages scientifiques
TYPO-OFFSET
GAP (Hautes-Alpes)
Dépôt légal n° 35
1965